GEORGE GAMOW

Treizeci de ani care au zguduit fizica

Istoria teoriei cuantice

Ilustrată de autor

OO

EDITURA ŞTIINŢIFICĂ
Bucureşti 1969

In românește de: I. CIUC şi D. NEAGU

George Gamow
THIRTY YEARS
THAT SHOOK PHYSICS
The Story of Quantum Theory
Uustrations by the Author

Doubleday & Company, Inc. Garden Citv, New York 1966

PRIETENILOR MEI DIN TINEREŢE

NOTĂ BIOGRAFICĂ

Treizeci de ani care au zguduit fizica este o lucrare care pune în evidenţă atît talentul artistic al Dr. Gamow, cît şi capacitatea sa de a expune subiecte ştiinţifice în limbaj neprofesional. In ceea ce priveşte pictura, Dr. Gamow însuşi a recunoscut că maestrul său este Sandro Botticelli; oricărui student în arte această carte i-ar putea oferi un interesant exerciţiu suplimentar, constînd în stabilirea influenţei lui Bott icelli în schiţele de portret ale lui Max Planck (pag. 17) şi Niels Bohr (pag. 38). Legătura ulterioară dintre stilul Dr. Gamow şi stilul devenit recent notoriu — Pop Art — este mai lesne de recunoscut. Spiritele cu înclinaţii filozofice vor găsi probabil semnificativ faptul că fluxul continuu al artei de la Renaşterea italiană, la cea din Madison Avenue, de la mijlocul secolului al XX-lea, îşi găseşte expresia în lucrările unui fizician matematician, celebru pentru dezvoltarea pe care a dat-o teoriei Marei Explozii *(Big Bang)* a creaţiei cosmice.

Probabil că puţini sau chiar nici unul dintre fizicienii contemporani nu ar fi putut elabora o

carte ca cea de faţă, chiar dacă ar putea scrie cu aceeaşi savoare şi ar domina în egală măsură dificultăţile ştiinţei. Cartea constituie o privire retrospectivă a unei perioade cruciale de dezvoltare intelectuală, scrisă de cineva care a lost o prezenţă activă in cadrul ei. Numele ilustre pe care le veţi întîlni în paginile ce urmează au fost pentru Dr. Gamow mai mult decît nişte nume; aceşti titani ai ştiinţei, care au recreat universul în mintea omului, au fost profesorii lui, prietenii lui şi colegii lui. împrejurările cosmopolite ale vieţii lui i-au oferit marea şansă de a fi printre aceştia în momente cînd s-au produs multe dintre evenimentele memorabile ale acestor treizeci de ani care au zguduit fizica.

Dr. Gamow s-a născut la 4 martie 1904, la Odesa, în Rusia. Din fragedă tinereţe s-a dedicat ştiinţei şi timp de un an a studiat paleontologia. După cum spunea mai tîrziu, această experienţă l-a făcut în stare „să deosebească un dinozaur de o pisică, după forma degetului mic de la picior". A studiat la Universitatea din Leningrad, unde a căpătat în anul 1928 titlul de doctor, şi pe urmă a studiat un an la Universitatea din Gottingen, în Germania, ca bursier. în anul 1928 — 1929 a lucrat la Copenhaga cu Niels Bohr, iar în 1929 — 1930 cu Ernest Rutherford, la Laboratorul Cavendish din Cambridge, Anglia.

Dr. Gamow avea 24 de ani cînd a adus prima contribuţie mai importantă în fizica teoretică. Concomitent, dar independent unii de alţii, Gamow, fizicianul american E.U. Condon şi fizicianul englez R.W. Gurney au explicat emisia particulelor alfa din nucleele radioactive, aplicînd acestui proces metodele, pe atunci, noi, ale mecanicii ondulatorii. Doi ani mai tîrziu, în 1930, el a prezis — ceea ce s-a şi adeverit — că protonii vor fi mai utili decît particulele alfa în experienţele cunoscute sub denumirea populară de „spargerea atomilor[11] şi, în acelaşi an, a emis ideea modelului în formă de picătură pentru nucleele elementelor grele. în anul

1929, în colaborare cu R. Atkinson şi F. Houtermans, a formulat teoria după care căldura şi lumina solară se da- toresc unor procese termonucleare, iar teoria sa asupra originii elementelor chimice bazată pe captura de neutroni a dominat gîndirea cosmologică între 1940 şi 1950. El a adus de asemenea contribuţii la studiul problemelor de bază ale biologiei, formulînd ideea că cei patru nucleotizi ai moleculei de acid dezoxiribonucleic (ADN) formează un ccd ale cărui diferite combinaţii joacă rolul de şablon în organizarea diferitelor molecule de aminoacizi.

Caracteristicile personale ale Dr. Gamow sînt aproape tot atît de impresionante ca şi rezultatele activităţii sale. De statură uriaşă, avînd peste l.£0 m şi peste 100 kg, el este înzestrat cu un umor şugubăţ, după cum prea bine ştiu cititorii din fanteziile d-lui Tompkins, personaj creat de el. Cînd, în 1948, împreună cu R.Alpher, un student al său, trebuiau să semneze calculele preliminare ale lucrării lor *Originea elementelor chimice,* Gamow a remarcat: „Ceva lipseşte[11] şi, atribuind *in absentia* o parte din merit lui Hans Bethe, a semnat „Alpher, Bethe şi Gamow“. Dr. Gamow este un lector frecvent şi popular, vorbind şase limbi, cu un accent foarte puternic, ceea ce a făcut pe un prieten să observe că cele şase limbi constituie toate dialecte diferite ale uneia singure — ale „gamowianei". Urme de gamowiană se găsesc din cînd în cînd şi în stilul lui literar, dar editorul care le-ar exclude fără milă s-ar dovedi a fi un pedant de cea mai rea speţă, insensibil la îmbogăţirea individuală a limbii.

Multilateralitatea Dr. Gamow, ca lingvist, cu toată pronunţarea cu accent, reflectă ţările pe care le-a parcurs în cariera lui profesională. După studiile cu Bohr şi Ruther- ford, el s-a reîntors în Rusia ca cercetător principal la Academia de Ştiinţe din Leningrad, dar şi-a părăsit ţara natală definitiv în 1933. A ţinut lecţii la Paris şi Londra şi pe urmă la Şcoala de vară a Universităţii din Michingan, pe

urmă a lucrat la Facultatea Universităţii George Washingtcn, din Washington, în calitate de profesor de fizică, din 1934 pînă în 1956. El a devenit cetăţean al Statelor Unite în 1940 şi a lucrat în timpul celui de al doilea război mondial ca consultant al marinei, armatei şi aviaţiei şi al Comisiei de energie atomică. Din 1956 lucrează la Universitatea din Colorado, Boulder.

Dr. Gamow a scris multe articole de specialitate şi o carte de specialitate, *Nucleul atomic* (Oxford University Press, 1931, revăzută în 1937 şi în 1949). Activitatea sa de popularizare cuprinde numeroase articole în revista „Scientific American[11] şi următoarele cărţi:

Mr. Tompkins in Wonderland, (Dl. Tompkins în ţara minunilor), Cambridge University Press, 1939;

Mr. Tompkins Explores the Atom (Dl.Tompkins explorează atomul), Cambridge University Press, 1943;

Mr. Tompkins Learns the Facts of Life (Dl. Tompkins învaţă adevărurile vieţii), Cambridge University Press, 1953;

Atomic Energy in Cosmic and Human Life (Energia atomică în viaţa cosmosului şi a omului), Cambridge University Press, 1945;

The Birth and Death of the Sun (Naşterea şi moartea Soarelui), Viking Press, 1941;

Biography of the Earth (Biografia Pămîntului), Viking Press, 1943;

One, Two, Three... Infinity (Unu, doi, trei... infinit), Viking Press, 1952 (Editura Tineretului, Bucureşti, 1958);

Creation of the Universe (Formarea Universului), Viking Press, 1952;

Puzzle—Math (Enigme matematice) în colaborare cu **M.** Stern, Viking Press, 1958, (Editura Ştiinţifică, Bucureşti, 1961);

The Moon (Luna), H.Schumann, 1953;

Matter, Earth and Sky (Materie, Pămînt si Cer), Prentice- Hall, 1958; ed. 2, 1965;

Physics: Foundation and Frontiers (Fizica: bazele

şi limitele ei) în colaborare cu J. C 1 e v e 1 a n d, Prentice- Hall, 1960;

Atom and Its Nucleus (Atomul si nucleul său), Prentice- Hall, 1961;

Biography of Physics (Biografia fizicii), Harper and Bro- thers, 1961, (în curs de apariţie şi în Editura Ştiinţifică);

A Star Called the Sun (O stea numită Soare), Viking Press, 1965, (Editura Ştiinţifică, 1969);

A Planet Called the Earth (O planetă numită Pămînt), Viking Press, 1965, (Editura Ştiinţifică, 1968).

El a început să ilustreze singur cea de-a doua carte din seria *Dl. Tompkins,* deoarece cel de-al doilea război mondial a întrerupt colaborarea sa cu pictorul englez cu care a lucrat la ilustrarea primei cărţi din seria *Dl. Tompkins*. In 1956, a primit de la UNESCO „Premiul Kalinga[11] pentru lucrările sale de popularizare a ştiinţei pentru cititorii neprofesionişti.

Dr. Gamow este membru al Academiei Regale de Ştiinţe daneze şi al Academiei Naţionale de Ştiinţă a Statelor Unite.

JOHN H. DURSTON

PREFAŢĂ

Două mari teorii au revoluţionat fizica în primele decenii ale secolului al XX-lea: *teoria relativităţii* şi *teoria cuantică.* Prima a fost în esenţă creaţia unui singur om, a lui Albert Einstein, şi a apărut în două etape: teoria relativităţii re- strînse, publicată în 1905, şi teoria relativităţii generale, publicată în 1915. Teoria relativităţii a implicat o modificare radicală a noţiunilor clasice ncwtoniene de spaţiu şi timp, ca două mărimi independente în descrierea li mii fizice, şi a condus la viziunea unei lumi cuadridimensionale, în care timpul este considerat ca o a patra coordonată, deşi nu este în întregime echivalentă cu cele trei coordonate spaţiale. Teoria relativităţii a intredus modificări importante în tratarea mişcării electronilor în atomi, a mişcării planetelor în sistemul solar şi a mişcării galaxiilor în univers.

Teoria cuantică, dimpotrivă, este creaţia cîtorva mari oameni de ştiinţă, începînd cu Max Planele, care a introdus în fizică noţiunea de cuantă de energie. Teoria cuantică a parcurs cîteva stadii şi în prezent oferă o înţelegere adîncă atît a structurii atomilor şi a nucleelor atcmice cît şi a corpurilor cu dimensiuni familiare nouă în urma experienţei de toate zilele. în prezent, teoria cuantică nu este încă încheiată; în special în relaţiile ei cu teoria relativităţii şi în problema particulelor elementare; dezvoltarea ei s-a oprit (temporar), izbindu-se de dificultăţi considerabile.

Această carte va expune dezvoltarea teoriei cuantice. Autorul a făcut cunoştinţă cu ideea de cuantă şi cu modelul atomic al lui Bohr la virsta de 18 ani, cînd a intrat ca student la Universitatea din Leningrad. Ulterior, la virsta de 24 ani, a avut norocul de a deveni studentul lui Bohr, la Copenhaga. De-a lungul anilor memorabili de la *paa Bleg- damsvej* (adresa institutului lui Bohr) el a avut ocazia să se întîlnească cu mulţi dintre oamenii de ştiinţă care au contribuit la dezvoltarea iniţială a teoriei cuantice şi de a lua parte la discuţiile lor. Expunerea care urmează este o sinteză a acestor

experienţe, centrată pe marea şi amicala figură a lui Niels Bohr. Autorul speră că generaţia nouă de fizicieni va găsi în paginile ce urmează unele informaţii interesante.

GEORGE GAMOW

Ianuarie 1965

începutul secolului al XX-lea a anunţat o eră fără precedent, în care teoriile clasice, teorii care au dominat fizica încă din timpurile pre-newtoniene, au fost reevaluate şi răsturnate. Luînd cuvîntul la 14 decembrie 1900, la o şedinţă a Societăţii germane de fizică, Max Planck a arătat că paradoxele care abundă în teoria clasică a emisiei şi absorbţiei luminii de către corpurile materiale ar putea fi înlăturate dacă s-ar presupune că *energia radiantă poate exista numai în formă de porţii discrete.* Planck a denumit aceste porţii *cuante de lumină.* Cinci ani mai tîrziu, *Albert Ein- stein* a aplicat cu succes ideea cuantelor de lumină pentru a explica legile empirice ale efectului fotoelectric, adică emisia electronilor de către suprafeţele metalice iluminate cu lumină violetă şi ultravioletă. Ceva mai tîrziu *Arthur Comp- ton* a făcut experienţele sale clasice, care au arătat că difracţia razelor X de către electronii liberi are loc după aceeaşi lege ca şi ciocnirea dintre două sfere elastice. Şi astfel, în cîţiva ani, noua idee a cuantificării energiei radiante s-a instalat ferm atît în fizica teoretică, cît şi în cea experimentală.

în anul 1913, fizicianul danez *Niels Bohr* a extins ideea lui Planck a cuantificării energiei radiante la descrierea energiei mecanice a electronilor din atom. Introducînd „reguli de cuantificare[11] specifice pentru sistemele mecanice de dimensiunile atomului, el a reuşit să dea o interpretare logică modelului planetar al atomului al lui Ernst Rutherford, model care avea o foarte serioasă bază experimentală, dar care, pe de altă parte, contrazicea net toate noţiunile fundamentale ale fizicii clasice. Bohr a calculat energiile corespunzătoare diferitelor stări cuantice discrete ale electronilor atomici şi a interpretat emisia de lumină ca expulzare a unei cuante de lumină avînd o energie egală cu diferenţa energiilor stărilor cuantice iniţiale şi finale ale electronului atomic. Calculele sale erau în stare să explice în amănunţime liniile spectrale ale hidrogenului şi ale elementelor mai grele, o problemă care chinuise pe spectro- scopişti timp de decenii. Prima lucrare a lui Bohr asupra teoriei cuantice a atomului a avut efectul unui cataclism. în cursul unui deceniu, datorită eforturilor unite ale fizicienilor din multe ţări, atît teoreticieni cit şi experimentatori, au fost înţelese pînă în detaliu proprietăţile optice, magnetice şi chimice ale diferiţilor atomi. Dar pe măsură ce anii treceau, devenea din ce în ce mai clar că teoria lui Bohr, cu toate succesele ei, nu era încă o teorie definitivă, deoarece nu era în stare să explice unele din faptele cunoscute despre atomi. De exemplu, ea nu reuşea să descrie procesul de tranziţie a unui electron de la o stare cuantică la alta, şi nu exista nici o posibilitate de a calcula intensitatea diverselor linii ale spectrelor optice.

în anul 1925, un fizician francez, *Louis de Broglie,* a publicat un articol în care a dat o explicaţie cu totul neaşteptată orbitelor cuantice

ale lui Bohr. După de Broglie, mişcarea fiecărui electron este guvernată de o misterioasă *unaă-pilot,* a cărei viteză de propagare şi lungime de undă depind de viteza electronului respectiv. Presupunînd că lungimea acestor unde-pilot este invers proporţională cu viteza electronului, de Broglie a reuşit să arate că diversele orbite cuantice ale modelului lui Bohr ale atomului de hidrogen sînt tocmai acelea care pot cuprinde un *număr întreg* de unde pilot. în felul acesta modelul atomului a început să arate ca un fel de instrument muzical cu un ton de bază (orbita fundamentală cu energia cea mai mică) şi diferite armonice (descriind orbite cu energii mai mari). Un an de la publicare, ideile lui de Broglie au fost extinse şi puse într-o formă matematică mai riguroasă de către fizicianul austriac *Erwin Sch- rodinger,* a cărui teorie a devenit cunoscută sub numele de *mecanică ondulatorie.* Explicînd toate fenomenele atomice pe carele explica şi teoria lui Bohr, mecanica ondulatorie explica totodată şi acele fenomene pe care teoria lui Bohr nu reuşea să le explice (ca intensităţile liniilor spectrale etc.) şi, în plus, prezicea cîteva fenomene noi (ca de exemplu difracţia unui fascicul de electroni) care nu fuseseră nici măcar visate în cadrul fizicii clasice sau în cadrul teoriei cuantice a lui Planck-Bohr. Mecanica ondulatorie oferea de fapt o teorie completă şi absolut coerentă a tuturor fenomenelor atomice şi putea să explice, aşa cum au arătat următoarele două decenii, atît fenomenele dezintegrării radioactive cît şi transformările nucleare artificiale.

Simultan cu articolul lui Schiodinger cu privire la mecanica ondulatorie a apărut şi articolul unui tînăr fizician german, *Werner Heisenberg,* care a dezvoltat tratarea problemelor cuantice utilizînd aşa-numita „algebră necomuta- tivă“, o disciplină matematică în care $a \times b$ nu este în mod necesar egal cu $b \times a$. Apariţia simultană a articolelor lui Schrodinger şi Heisenberg în două reviste germane

diferite („Ann. der Phvs“. şi „Zeitsch. fur Phys.“) a uluit lumea fizicii teoretice. Aceste două articole arătau pe cît se poate de diferit, dar conduceau la exact aceleaşi rezultate în ceea ce priveşte spectrele şi structura atomilor. Şi a trebuit mai mult deun anpînăcînd s-a stabilit că cele două teorii erau din punct de vedere fizic identice, ele fiind doar exprimate în două forme matematice complet diferite. Era ca şi cum America ar fi fost descoperită de Columb,care străbătea Oceanul Atlantic plutind spre vest, şi de un japonez la fel de îndrăzneţ, care străbătea Oceanul Pacific plutind spre est.

In buchetul teoriei cuantice însă rămînea încă un spin ascuţit, un spin care se făcea simţit în mod dureros ori de cîte ori se încerca cuantificarea sistemelor mecanice, care datorită vitezelor mari pe care le implicau (apropiate de viteza luminii) cereau o tratare relativistă. Multe încercări de a reuni teoria relativităţii cu teoria cuantică au rămas infructuoase pînă cînd, în cele din urmă, în 1929, un fizician englez, *P.A.M. Dirac,* a scris faimoasa sa *Ecuaţie de undă relativistă.* Soluţiile acestei ecuaţii dădeau o descriere perfectă a mişcărilor electronilor atomici la viteze apropiate de cea a luminii şi ofereau automat ca un fel de supliment neaşteptat, explicaţia impulsurilor, momentelor cinetice liniare, mecanice şi unghiulare şi a celor magnetice ale acestora. Anumite dificultăţi formale legate de manipularea acestei ecuaţii i-au sugerat lui Dirac ideea că alături de electronii obişnuiţi încărcaţi negativ *trebuie să existe de asemenea şi anti-electroni, încărcaţi pozitiv.* Previziunea acestuia a fost confirmată în mod strălucit cîţiva ani mai tîrziu, cînd anti-electronii au fost găsiţi în razele cosmice. Teoria *antiparticulelor* a fost extinsă şi la alte particule elementare, în afara electronilor, şi astăzi avem anti-protoni, anti-neu- troni, anti-mezoni etc.

Şi astfel, prin 1930, la numai trei decenii după memorabila comunicare a lui Planck, teoria

cuantică a căpătat acea formă finală care astăzi ne este familiară. în deceniile care au urmat acestor dezvoltări, elaborate cu o viteză care tăia respiraţia, s-au făcut foarte puţine progrese teoretice. Pe de altă parte însă, aceşti din urmă ani au fost foarte fructuoşi în domeniul studiilor experimentale, în special în ceea ce priveşte investigarea numeroaselor particule elementare nou descoperite. Sîntem încă în aşteptarea unei străpungeri a solidului zid de dificultăţi care ne împiedică să înţelegem existenţa însăşi a particulelor elementare, masele, sarcinile, momentele magnetice şi interacţiunile acestora. Este în afara oricărei îndoieli că atunci cînd această străpungere se va realiza, ea va implica noţiuni noi care se vor deosebi de acelea de astăzi tot atît pe cît se deosebesc noţiunile de azi de cele ale fizicii clasice.

In capitolele care urmează, vom încerca să descriem dezvoltarea de-a lungul primelor trei decenii de creştere turbulentă a teoriei cuantice a energiei şi materiei, subliniind diferenţele conceptuale dintre „buna şi bătrîna“ fizică clasică şi noul aspect pe care l-a luat fizica în secolul al XX-lea.

M. PLANCK SI CUANTELE DE LUMINĂ

Ideea revoluţionară a lui Max Planck care afirmă că

lumina poate fi emisă şi absorbită numai sub forma unor anumite porţii discrete de energie işi are rădăcinile în studiile mult mai vechi ale lui Ludwig Boltzmann, James Clerk Maxwell, Josiah Willard Gibbs şi ale altora privind descrierea statistică a proprietăţilor termice ale corpurilor materiale. Teoria cinetică a căldurii consideră căldura ca fiind rezultatul mişcării haotice a numeroaselor molecule individuale din care sînt formate corpurile materiale. Deoarece este imposibil (şi de asemenea lipsit de finalitate) să urmărim mişcarea fiecărei molecule individuale participante la mişcarea termică, descrierea matematică a fenomenului căldurii trebuie să utilizeze în mod necesar metode statistice. După cum economistul planificator nu-şi bate capul să cunoască exact cîte hectare a semănat fermierul John Doe sau cîţi porci posedă acesta, fizicianul nu se interesează de poziţia şi viteza unei molecule din gaz, care este format dintr-un număr foarte mare de molecule individuale. Tot ce contează, ca şi tot ce prezintă importanţă pentru ecor.cmia unei ţări sau pentru comportarea macroscopică a unui gaz, sînt valorile medii luate pe un număr mare de fermieri, respectiv molecule.

Una din legile de bază ale *mecanicii statistice,* care comportă studiul valorilor medii ale proprietăţilor fizice ale unor ansamble foarte mari de particule individuale aflate în mişcare haotică, este aşa-numita *teoremă a echipartiţiei,* care poate fi dedusă matematic din legile mecanicii newtoniene. Aceasta afirmă: *energia totală conţinută de ansamblul unui număr mare de particule individuale, care fac schimb de energie între ele prin ciocniri mutuale, este distribuită egal (in medie) pe toate particulele.* Dacă toate particulele sînt identice, ca de exemplu, în cazul unui gaz pur, ca oxigenul sau neonul, toate particulele vor avea în medie viteze egale şi energii cinetice egale. Notînd cu E energia totală disponibilă în sistem şi cu N numărul total al

particulelor, putem afirma că energia medie pe particulă este *E/N.* Dacă avem un amestec de diferite tipuri de particule, ca de exemplu în cazul mixturii a două sau mai multor gaze diferite, moleculele mai masive vor avea viteze mai mici, astfel că energiile lor cinetice (proporţionale cu masa şi cu pătratul vitezei) vor fi în medie aceleaşi cu cele ale moleculelor mai uşoare.

Să considerăm, de exemplu, un amestec de hidrogen şi oxigen. Moleculele de oxigen care sînt de 16 ori mai grele de- cît cele de hidrogen, vor avea în medie viteze de 1'16 = 4 ori mai mici decît acestea din urmă*.

în timp ce legea de echipartiţie guvernează distribuţia medie a energiilor pe membrii unei mulţimi mari de particule, vitezele şi energiile particulelor individuale pot să se deosebească de cele medii, fenomen care este cunoscut sub numele de *fluctuaţii statistice.* Şi fluctuaţiile pot fi tratate matematic, curbele care rezultă arătînd numărul relativ de particule care au viteze mai mari sau mai mici decît cea medie pentru temperatura dată. Astfel de cuibe, calculate pentru prima oară de J. Clerk Maxwell şi purtînd numele său, sînt arătate în fig. 1, pentru trei temperaturi diferite ale gazului. Folosirea metodelor statistice în studiul mişcării termice a moleculelor a dat rezultate fructuoase în explicarea proprietăţilor termice ale corpurilor materiale, în special

* Deoarece energia cinetică este produsul *mr,* adică dintre *masă* şi *pătratul vitezei,* acest produs va rămîne acelaşi dacă masa creşte cu

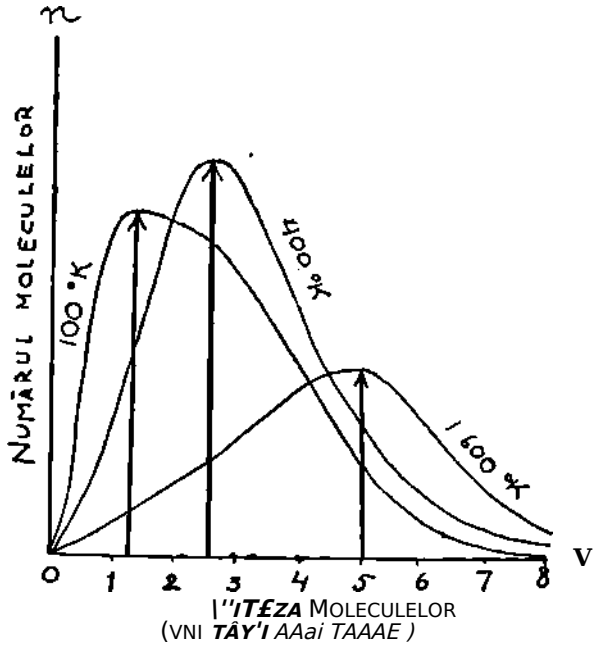


FIG. I.
Distribuţia maxwelliană: numărul moleculelor care au viteze diferite v este reprezentat funcţie de aceste viteze pentru trei temperaturi diferite, 100°, *400° şi I 600° K. Deoarece numărul moleculelor în vas rămîne constant, suprafeţele subscrise de aceste curbe sînt egale. Vitezele medii ale moleculelor cresc proporţional cu rădăcina pătrată a temperaturii absolute.*

în cazul gazelor; în cazul aplicării la gaze, teoria este mult simplificată datorită faptului că moleculele de gaz zboară liber prin spaţiu în loc de a fi împachetate strîns împreună, ca în lichide şi solide.

MECANICA STATISTICA ŞI RADIAŢIA TERMICĂ

Spre sfîrşitul secolului al XlX-lea, lordul Rayleigh şi Sir James Jeans au încercat să extindă metoda statistică, atît de folositoare în înţelegerea proprietăţilor termice ale cor-

2*

purilor materiale, la problema radiaţiei termice. Toate corpurile materiale încălzite emit unde electromagnetice de diferite lungimi de undă. Cînd temperatura este relativ scăzută — de exemplu, punctul de fierbere al apei — lungimea de undă predominantă în radiaţia emisă este relativ mare. Aceste unde nu impresionează retina ochiului nostru (adică sînt invizibile), dar sînt absorbite de pielea noastră, pro- ducînd senzaţia de căldură; ca urmare se vorbeşte de căldură sau de *radiaţie infraroşie.* Atunci cînd temperatura creşte la circa 600°C (temperatură caracteristică pentru dispozitivele de încălzire electrice) se observă o lumină slabă roşie. La 2 000°C (corespunzătoare filamentului unui bec electric) are loc emisia unei lumini strălucitoare albe, care conţine toate lungimile de undă ale *spectrului radiaţiei vizibile,* de la roşu la violet. La temperatura şi mai ridicată a arcului electric, la 4 000°C, începe să fie emisă o cantitate considerabilă de *radiaţie ultravioletă,* a cărei intensitate creşte rapid cu creşterea ulterioară a temperaturii. Pentru fiecare temperatură dată există o frecvenţă de oscilaţie predominantă a cărei intensitate este maximă şi pe măsură ce temperatura creşte, creşte şi această frecvenţă predominantă. Situaţia este reprezentată grafic în fig. 2, care dă distribuţia intensităţii spectrelor corespunzătoare la trei temperaturi diferite.

Comparînd curbele din fig. 1 şi 2, remarcăm o similitudine calitativă remarcabilă. în timp ce în primul caz creşterea temperaturii duce la deplasarea maximumului curbei spre viteze moleculare mai mari, în al doilea caz duce la deplasarea maximumului spre frecvenţe de radiaţii mai mari. Această similitudine i-a îndemnat pe Rayleigh şi Jeans să utilizeze în cazul radiaţiei termice acelaşi principiu de echipartiţie, care s-a dovedit a fi atît de fructuos în cazul gazelor; adică să presupună că toată energia de radiaţie disponibilă este egal distribuită pe toate

frecvenţele de oscilaţie posibile, încercarea a condus însă, vai, la rezultate catastrofale! Necazul venea de acolo că în ciuda tuturor similitudinilor, între un gaz format din molecule discrete şi o radiaţie termică formată din oscilaţii electromagnetice există totuşi o diferenţă categorică: în timp ce numărul de molecule de gaz într-un recipient dat este totdeauna finit, deşi în mod obişnuit foarte mare, numărul oscilaţiilor electromagnetice posibile în acelaşi recipient este totdeauna infinit. Pentru a

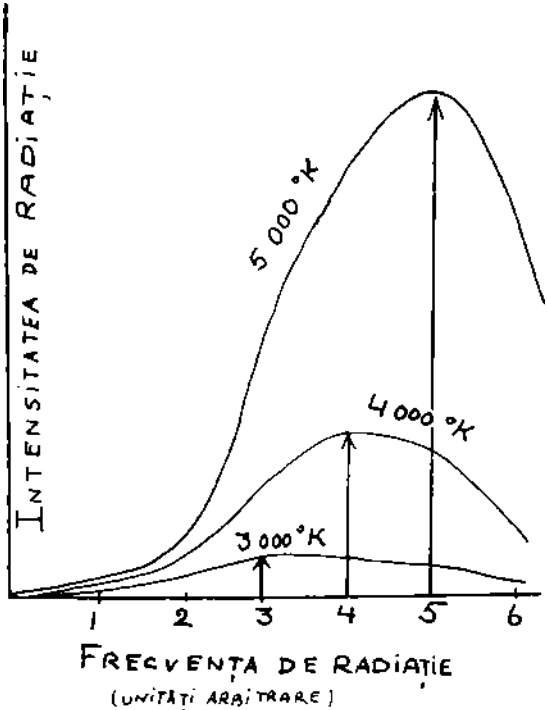


FIG. 2.
Distribuţia observată a intensităţilor radiaţiei pentru diferite frecvenţe (v) este *trasată funcţie de frecvenţă. Deoarece energia radiată de fiecare unitate de volum creşte cu puterea a patra a temperaturii absolute T, suprafeţele de sub curbe cresc. Frecvenţa corespunzătoare maximului de intensitate creşte proporţional cu temperatura absolută.*

înţelege această afirmaţie trebuie să ne reamintim că tabloul mişcării ondulatorii, să zicem într-un cub, este format prin suprapunerea diferitelor unde staţionare care au nodurile lor pe pereţii cubului.

Situaţia poate fi vizualizată mai uşor în cazul mai simplu al unei mişcări ondulatorii unidimensionale, ca de exemplu, în cazul unei corzi fixate la ambele capete. Deoarece cape-

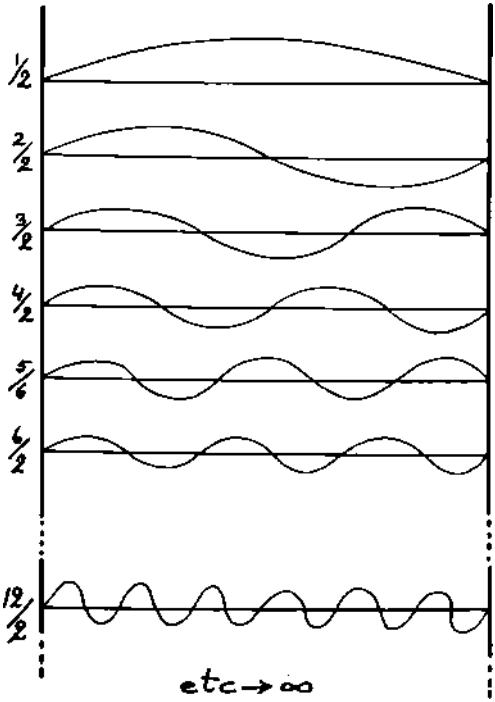


FIG. 3.
Tonul de bază şi armonicele superioare în cazul unui continuu monodimensional — de exemplu, în cazul unei coarde de vioară.

tele corzii nu se pot mişca, singurele oscilaţii posibile sînt acelea arătate în fig. 3, care corespund, în termeni muzicali, la tonul fundamental şi la diferitele armonice ale corzii oscilante. Pe întreaga lungime a corzii se poate înscrie o semiundă, două semiunde, treisemiunde, zece semiunde, ... o sută, o mie, un milion, un bilion... orice număr de semiunde. Frecvenţele de oscilaţii corespunzătoare diverselor armonice vor fi dublul, triplul... de zece ori, de o sută de ori, de un milion de ori, de un bilion de ori... etc., frecvenţa tonului de bază.

In cazul undelor staţionare în interiorul unui recipient tridimensional, ca de exemplu un cub,

situaţia va fi similară, deşi ceva mai complicată, rezultind intr-un număr nelimitat de diferite oscilaţii cu lungimi de undă din ce în ce mai scurte şi corespunzător cu frecvenţe din ce în ce mai înalte. Astfel că, dacă *E* este întreaga cantitate de energie radiantă disponibilă în recipient, principiul de echipartiţie conduce la concluzia că fiecărei oscialaţii individuale îi revine o cantitate de energie *E/oo,* o cantitate infinit mică de energiei Caracterul paradoxal al acestei concluzii este evident, dar noi putem să îl subliniem şi mai puternic prin următoarele consideraţii.

Să presupunem că avem un recipient cubic, cunoscut drept „cubul lui Jeans", care are pereţii interiori făcuţi din oglinzi ideale, oglinzi care reflectă sută la sută lumina ce cade pe ele. Desigur, astfel de oglinzi nu există şi nici nu pot fi fabricate; chiar cele mai bune oglinzi absorb o mică fracţiune din lumina incidenţă. în discuţiile teoretice însă, noţiuni ca acestea, de oglinzi ideale, pot fi folosite drept caz limită al unor oglinzi foarte bune. Acest mod de a raţiona, cînd *gîndim* care ar fi rezultatul unei experienţe cu astfel de oglinzi ideale, suprafeţe fără frecare, bare fără greutate etc., se cunoaşte sub numele de „experiment mental" (termenul original *Gedankenexperiment* şi este adesea folosit în diferitele ramuri ale fizicii teoretice. Dacă într-un astfel de cub al lui Jeans perforăm într-unul din pereţi un mic orificiu şi trimitem în interior o cantitate oarecare de lumină, după care închidem orificiul ideal, lumina va rămîne în interior pentru un timp indefinit, fiind reflectată de la un perete la altul de oglinzile ideale. Dacă, ceva mai tîrziu, redeschidem orificiul, vom observa sclipirea luminii care iese. Situaţia este în principiu identică cu aceea în care se pompează o cantitate oarecare de gaz într-un recipient oarecare, închis, şi care este eliberată din nou ceva mai tîrziu. Hidrogenul gazos poate rămîne un timp indefinit într-un recipient de sticlă, fiind un caz ideal. Hidrogenul însă nu va rămîne mult timp într-un conteiner făcut din

metalul paladiu, deoarece se cunoaşte că moleculele de hidrogen difuzează relativ uşor prin acest material. De asemenea, nu se poate utiliza un recipient de sticlă pentru a păstra acidul fluorhidric, deoarece acesta reacţionează chimic cu pereţii de sticlă. în fine, cubul lui Jeans cu pereţii lui din oglinzi ideale nu este un lucru chiar aşa de fantastic!

Există, totuşi, o diferenţă între gazul şi radiaţia închise în recipient. Deoarece moleculele nu sînt puncte matematice, ci au anumite diametre finite, ele suferă numeroase ciocniri în cadrul cărora poate avea loc schimbul de energie. Dacă noi, de exemplu, vom injecta într-un recipient o cantitate oarecare de gaz cald şi una de gaz rece, ciocnirile mutuale dintre molecule vor coborî repede viteza celor rapide şi o vor creşte pe a celor lente, rezultînd o distribuţie egală a energiei, în conformitate cu principiul echipartiţiei. în cazul unui gaz ideal, format din molecule-puncte, care desigur în natură nu există, ciocnirile mutuale nu vor avea loc şi fracţiunea caldă a gazului va rămîne caldă, în timp ce fracţiunea rece va rămîne rece. Schimbul de energie dintre moleculele unui gaz ideal poate fi totuşi stimulat prin introducerea în recipient a uneia sau a mai multor particule cu diametre mici dar finite (particule browniene). Ciocnindu-se cu acestea, moleculele punctidimensionale rapide vor transmite acestora energia lor, care la rîndul ei va fi transmisă celorlalte molecule punctidimensionale lente.

în cazul undelor luminoase, situaţia este diferită, deoarece două unde luminoase care îşi încrucişează drumurile nu-şi influenţează reciproc propagarea† cu nimic. Aşa că, pentru a provoca

†Pentru a evita obiecţiile din partea acelor cititori care cunosc mai mult decît e necesar pentru înţelegerea acestei discuţii, autorul se grăbeşte să afirme că, în concordanţă cu electrodinamica cuantică modernă trebuie să ne aşteptăm la o oarecare difracţie a luminii de către lumină, datorită formării de perechi de electroni virtuali. Jeans şi Planck nu cunoşteau însă

schimbul de energie între undele staţionare de lungimi diferite, va trebui să introducem în recipient mici corpuri care să poată absorbi şi reemite toate lungimile de undă posibile, permiţînd în felul acesta schimbul de energie între toate oscilaţiile posibile. Corpurile negre obişnuite, ca de exemplu mangalul, posedă această proprietate, cel puţin în partea vizibilă a spectrului, şi noi putem imagina „corpuri negre ideale" care să se comporte în acelaşi mod în cazul tuturor lungimilor de undă posibile. Introducînd în cubul lui Jeans cîteva particule de praf de cărbune ideal, vcm rezolva prin urmare problema schimbului de energie.

Să realizăm acuma un experiment mental, injectînd într-un cub al lui Jeans, iniţial vid, o cantitate oarecare de

---

aceasta.

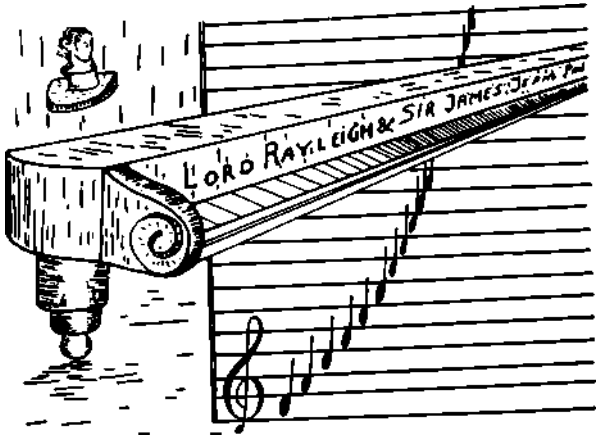


FIG. 4.
Un pian cu un număr nelimitat de clape, extinzîndu-se în regiunea ultrasonoră, pînă la frecvenţe infinite. Legea de ec hi pa rtiţie ar cere ca toată energia transmisă de un muzician uneia din clapele de joasă frecvenţă să călătorească tot drumul, spre regiunea ultrasonoră, în afara domeniului audio !

radiaţii de o lungime de undă dată — fie o cantitate oarecare de lumină roşie. Imediat după injecţie, interiorul cubului va conţine numai unde staţionare roşii care se întind de la un perete la altul, toate celelalte moduri de oscilaţie fiind absente. E ca şi cum am lovi pe un pian mare o singură clapă. Dacă, aşa cum se întîmplă de obicei în practică, are loc doar un schimb foarte slab de energie între diferitele părţi ale instrumentului, tonul va continua să răsune pînă cînd întreaga energie comunicată corzii va fi disipată prin amortizare. Dacă însă, prin armătura de care corzile sînt fixate, există o scurgere de energie între corzi, vor începe să vibreze şi celelalte corzi pînă cînd, potrivit teoremei de echipartiţie, toate cele 88 de corzi vor avea energii egale cu 1/88 din energia totală comunicată.

Dar, pentru ca un pian să reprezinte o analogie suficient de bună cu cubul lui Jeans, el trebuie să posede mult mai multe clape care să se extindă la

infinit în dreapta, în regiunea ultrasonoră (fig. 4). în felul acesta, energia transmisă unei corzi din regiunea sonoră va călători spre dreapta în regiunea tonurilor înalte şi se va pierde în regiunile infinit îndepărtate ale vibraţiilor ultrasonore, încît o bucată muzicală cîntată pe un astfel de pian se transformă într-un şuierat ascuţit. în mod asemănător, *energia luminii roşii injectate în cubul lui Jeans se va transforma în lumină albastră, violetă, ultravioletă, în raze X, în raze* y, *ş.a.m.d. fără vreo limită.* Ar fi temerar să stai în faţa unui cămin, deoarece lumina roşie radiată de prietenoşii cărbuni aprinşi s-ar transforma rapid în radiaţia de înaltă frecvenţă, periculoasă, a produselor de fisiune!

Scurgerea de energie în regiunea sunetelor înalte nu reprezintă un pericol real pentru concertele pianiştilor, nu numai pentru că numărul clapelor este limitat spre dreapta, ci în cea mai mare măsură pentru că, aşa cum s-a menţionat mai înainte, oscilaţia fiecărei corzi este amortizată prea repede ca să mai permită transferul chiar al unei părţi mici a energiei corzii vecine. In cazul energiei radiante, situaţia este însă mult mai serioasă şi dacă legea de echipartiţie ar fi valabilă şi în cazul acesta, uşiţa deschisă a unui boiler ar constitui o sursă excelentă de raze X şi raze y. Este evident că ceva trebuie să nu fie în regulă în raţionamentele fizicii secolului XIX şi că este necesar să se introducă nişte modificări substanţiale pentru a evita Catastrofa Ultravioletă, prevăzută teoretic, şi care nu apare niciodată în realitate.

MAX PLANCK *Şl CUANTA DE ENERGIE*

Problema termodinamicii radiaţiei a fost rezolvată de Max Planck, care a fost un fizician sută la sută clasic (fapt pentru care nu poate fi blamat). El este acela care a iniţiat ceea ce astăzi se cunoaşte ca *fizică modernă.* La începutul secolului, la o şedinţă

a Societăţii germane de fizică, din 14 decembrie 1900, Max Planck şi-a expus ideile sale asupra acestui subiect, idei care erau atît de neobişnuite şi de groteşti încît lui însuşi îi venea foarte greu să creadă în ele, cu toate că acestea au provocat o emoţie intensă a auditoriului şi în întreaga lume a fizicii.

Max Planck s-a născut la Kiel, în 1858, şi ulterior s-a mutat cu familia la Miinchen. El a terminat Gimnaziul Maxi- milian (cursul superior) la Munchen, pe uimă a intrat la Universitatea din Miinchen, unde a studiat timp de trei ani fizica. Anul următor şi l-a petrecut la Universitatea din Berlin, unde i-a cunoscut pe marii fizicieni ai timpului respectiv, Herman von Helmholtz, Gustav Kirchhoff şi Ru- dolph Qlausius şi a învăţat multe despre teoria căldurii, cunoscută în tehnică sub numele de termodinamică. Revenind la Miinchen, el a susţinut teza de doctorat despre Principiul al doilea al termodinamicii, căpătînd titlul de doctor în anul 1879, apoi a devenit asistent universitar la această universitate. Şase ani mai tîrziu a acceptat postul de conferenţiar la Kiel. în 1889 s-a mutat, în calitate de conferenţiar, la Universitatea din Berlin unde a devenit în 1892 profesor. Această poziţie constituia la timpul respectiv cel mai înalt post academic în Germania, şi Planck l-a păstrat pînă la retragerea sa, la vîrsta de 70 de ani. După retragere el a continuat să activeze şi a publicat pînă la moartea sa, survenită la aproape 90 de ani. Două din ultimele sale articole *(Autobiografie ştiinţifică* şi *Noţiunea de cauzalitate în fizică)* au fost publicate în 1947, anul morţii sale.

Planck a fost un profesor german, tipic pentru timpul său, serios şi probabil pedant , dar nu lipsit de un cald simţămînt uman, după cum se vede din corespondenţa sa cu Arnold Sommerfeld, care, continuînd opera lui Niels Bohr, aplica teoria cuantică la structura atomului. Referindu-se la cuantă ca la noţiunea lui Planck, Sommerfeld i-a scris într-o scrisoare:

Tu ai cultivat terenul cel virgin
Iar truda-mi fu doar florile să strîng

la care Planck a răspuns:

Cules-ai flori — şi eu la fel făcut-am!
Acum să punem florile cu toate împreună, Şi
schimb prietenesc făcînd cu ele, Strălucitoare,
să-mpletim, o unică cunună![‡]

Pentru succesele sale ştiinţifice Max Planck a primit multe onoruri academice. în 1894 el a devenit membru al Academiei prusiene de ştiinţă şi în 1926 a fost ales membru al Societăţii Regale din Londra. Şi, deşi nu a avut nici o contribuţie în astronomie, unul din noii asteroizi descoperiţi a fost denumit, în cinstea sa, „Planckiana[11].

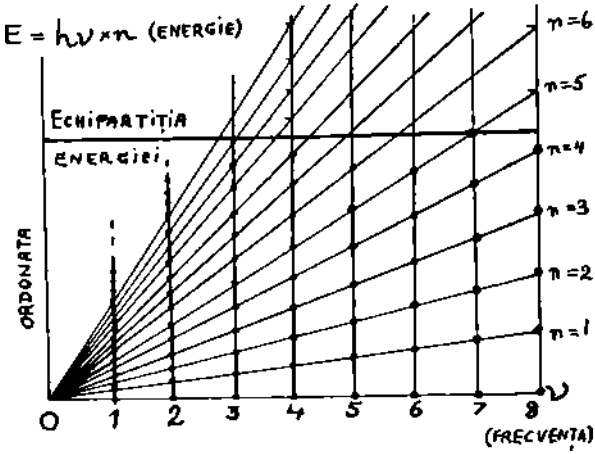
In tot timpul vieţii, Max Planck a fost preocupat aproape exclusiv de problemele termodinamicii şi nenumăratele articole pe care le-a publicat au fost suficient de importante ca să-i aducă poziţia de onoare de profesor la Berlin, la vîrsta de 34 de ani. Dar adevăratul moment de explozie în opera sa ştiinţifică, descoperirea *cuantei de energie,* penru care a primit în anul 1918 Premiul Nobel,a survenit într-o perioadă oarecum mai tîrzie a vieţii lui: Ia vîrsta de 42 de ani. Dar 42 de ani nu reprezintă aşa de mult în viaţa unui om, în scurgerea uzuală a ocupaţiilor sau profesiilor; în domeniul fizicii teoretice însă se întîmplă, de regulă, ca cele mai importante lucrări să fie realizate în jurul vîrstei de 25 de ani, vîrstă pînă la care se poate şti destul despre teoriile existente şi la care mintea este încă suficient de mobilă ca să poată concepe idei noi, îndrăzneţe, revoluţionare. Astfel, de pildă, Isaac Newton a elaborat legea gravitaţiei universale la vîrsta de 23 de ani; Albert Einstein a creat teoria relativităţii la vîrsta de 26 de ani; iar Niels Bohr şi-a publicat teoria asupra structurii atomului la vîrsta de 27 de ani. In scurtul lui drum şi autorul

‡ M. PLANCK. *Scientific Autobiography,* (Trad. engleză de F. Gay- nor), New-York, Philosophical Library, 1949.

acestei cărţi şi-a publicat lucrarea cea mai importantă, asupra transformărilor naturale şi artificiale ale nucleelor atomice, la vîrsta de 24 de ani. In comunicarea sa, Planck afirmă că în concordanţă cu calculele sale destul de complicate, concluziile paradoxale obţinute de Rayleigh şi Jeans pot fi depăşite şi pericolul catastrofei ultraviolete evitat, *dacă se postulează că energia undelor electromagnetice (inclusiv a celor luminoase) poate exista numai în forma unor porţii discrete, sau cuante, conţinutul în energie al fiecărei porţii fiind direct proporţional cu frecvenţa corespunzătoare.*

Consideraţiile teoretice în domeniul fizicii statistice sînt de o dificultate notorie, dar cercetînd graficele din fig. 5 se poate obţine o oarecare idee despre modul în care postulatul lui Planck „descurajează[11] energia radiantă de a se strecura în regiunea nelimitată a frecvenţelor înalte ale spectrului.

In graficul respectiv, frecvenţele posibile într-un cub „monodimensional[11] al lui Jeans sînt amplasate pe axa absciselor şi notate 1, 2, 3, 4 etc.; pe axa ordonatelor sînt



A&SCI5A

FIG. 5.
Dacă, în conformitate cu ipoteza lui Plonck, energia corespunzătoare fiecărei frecvenţe v trebuie să fie un multiplu întreg al cantităţii hv, *situaţia este complet diferită de cea arătată în diagramele anterioare. De exemplu, pentru* ***M*** = 4 *sînt opt stări de oscilaţie posibile, în timp ce pentru* ***M*** = 8 *sînt doar patru. Restricţia reduce numărul de oscilaţii posibile la frecvenţe înalte şi anulează paradoxul lui Jeons.*

amplasate energiile de oscilaţie care pot fi afectate fiecărei frecvenţe posibile. Potrivit fizicii clasice, este permisă orice valoare a energiei (adică orice punct de pe verticalele ridicate din 1, 2, 3 etc.), distribuţia rezultînd statistic conform principiului de echipartiţie a energiei între toate frecvenţele posibile. Pe de altă parte, postulatul lui Planck permite numai o mulţime discretă de valori ale energiei, energie egală cu o dată, de două ori, de trei ori etc. porţia de energie corespunzătoare frecvenţei date. Deoarece energia conţinută în fiecare porţie este considerată a fi proporţională cu frecvenţa, se obţine o mulţime de valori permise pentru energie, indicate în figură prin punctele negre mari. Cu cît frecvenţa este mai mare, cu atît este mai mic numărul de valori permise ale energiei sub limita dată, fapt care restrînge capacitatea oscilaţiilor de înaltă frecvenţă de a

prelua o energie suplimentară mai mare. Drept rezultat, cantitatea de energie care poate fi preluată de oscilaţiile de înaltă frecvenţă devine finită, în pofida numărului lor infinit şi totul se aranjează de minune.

S-a spus că există „minciuni, minciuni sfruntate, şi sta- tistici“, dar în cazul calculelor lui Planck statistica s-a arătat a fi pe deplin apropiată de adevăr. El a obţinut pentru distribuţia energiei în spectrul radiaţiei termice o formulă teoretică în perfectă concordanţă cu datele de observaţie arătate în fig. 2. In timp ce formula lui Rayleigh-Jeans se lansează în înălţimea cerurilor, cerînd o cantitate de energie totală infinită, formula lui Planck coboară la frecvenţele înalte şi forma sa este în concordanţă perfectă cu curbele observate. Aserţiunea lui Planck, precum că conţinutul în energie al unei cuante de radiaţie este proporţional cu frecvenţa, poate fi scrisă:

$$E = 7\mathrm{rv}$$

unde v (litera grecească niu) este frecvenţa, iar *h* este o constantă universală, cunoscută sub numele de *constanta lui Planck* sau *constanta cuantică.* Pentru ca curbele teoretice ale lui Planck să corespundă celor observate, lui *h* trebuie să i se atribuie o anumită valoare numerică, care s-a dovedit a fi 6,77 X 10“[27] în sistemul de unităţi centimetru-gram-se- cundă[§].

Valoarea atît de mică a acestei constante face ca teoria cuantică să nu prezinte importanţă pentru fenomenele la scară macroscopică, pe care le

§Dimensiunea fizică a constantei lui Planck, *h,* este produsul dintre energie şi timp, sau *(erg x sec)* în unităţi c.g.s. şi este cunoscută în mecanica clasică ca *acţiune*; acţiunea apare în multe raţionamente importante, ca de exemplu în principiul lui Hamilton — principiul minimei acţiuni.

întîlnim în viaţa de toate zilele, şi ca ea să apară numai în studiile proceselor care se desfăşoară la scară atomică.

CUANTELE DE LUMINĂ ŞI EFECTUL FOTOELECTRIC

Eliberînd spiritul cuantei din cutie, Max Planck a fost el însuşi speriat de moarte şi a preferat să considere că porţiile de energie rezultă nu din nişte proprietăţi ale undelor luminoase înseşi, ci din nişte proprietăţi interne ale atomilor care ar putea emite şi absorbi radiaţii numai în anumite cantităţi discrete. Radiaţia este ca untul care poate fi cumpărat sau înapoiat la băcănie numai în pachete de o sută de grame, cu toate că untul ca atare poate să existe în orice cantitate dorită (deşi, desigur, nu mai puţin decît o singură moleculă!) Dar numai la cinci ani de la originala propunere a lui Planck, s-a stabilit că cuanta de lumină este o entitate fizică care există independent de mecanismul emiterii sau absorbţiei ei de către atomi. Acest pas a fost făcut de Albert Einstein, într-un articol publicat în 1905, anul apariţiei primului său articol asupra teoriei relativităţii. Einstein a arătat că existenţa unor cuante de lumină rătăcind libere prin spaţiu constituie o condiţie necesară pentru explicarea legilor empirice ale efectului fotoelectric, adică a emisiei de electroni de către suprafeţele metalice iradiate cu raze violete sau ultraviolete.

Un dispozitiv elementar pentru demonstrarea efectului fotoelectric, arătat în fig. *6a,* constă dintr-un electroscop obişnuit, încărcat negativ, avînd ataşată o placă metalică curată, *P.* Cînd o rază de lumină pornită de la un arc electric, *A,* care este bogat în radiaţii violete şi ultraviolete, cade pe placă se observă că, pe măsură ce electroscopul se descarcă, lamelele *L* ale acestuia coboară. Faptul că descărcarea se datoreşte unor particule negative (electroni), care părăsesc placa metalică,

a fost demonstrat în repetate rînduri, între alţii şi de fizicianul american Robert Millikan (1868—1953). Dacă între arc şi placa metalică se interpune o placă de sticlă, care absoarbe radiaţia ultravioletă, electronii nu mai sînt emişi, ceea ce constituie o concluzie evidentă că emisia este cauzată de acţiunea razelor. Un dispozitiv mai rafinat utilizat pentru studierea detaliată a legilor efectului fotoelectric este arătat schematic în fig. *6b.* El este constituit din:

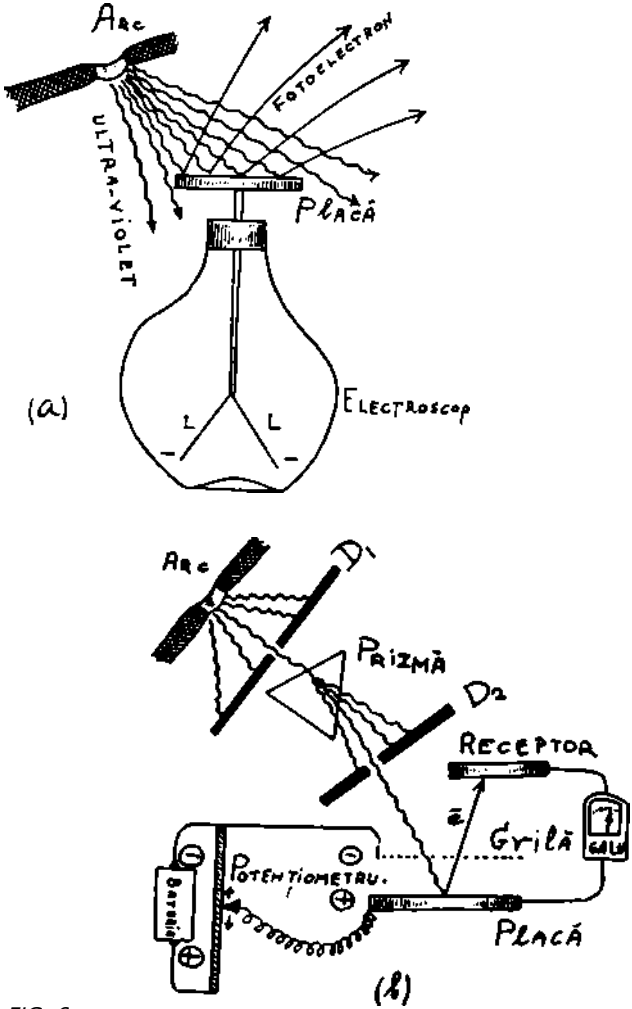


FIG. 6.
Studii experimentale ale efectului fotoelectric. în fa) este *ilustrată o metodă primitivă de demonstrare a efectului fotoelectric. Radiaţia ultravioletă emisă de un arc electric expulzează electronii din placa de metal legată de electro- scop. Foiţele* L încărcate *negativ, care* se *respingeau unele pe altele, pierd sarcina şi se coboară. în* (b)este arătată *metoda modernă. Radiaţia ultravioletă de la un arc electric trece printr-o prismă care permite să cadă pe placă doar o singură frecvenţă selectată. Rotind prisma, se poate selecta şi dirija pe placă o anumită lumină monocromatică. Energia fotoelectronilor este măsurată prin capacitatea lor de a străbate drumul de la placă la receptor, mişcîndu-se împotriva forţei electrice produsă cu ajutorul potenţiometrului montat între placă şi grilă.*

L. Landau, A. Bohr, G. Gamow, E. Bohr, E. Teller (Fotografiat! probabil de dr. H. A. Casimir) Copenhaga 1931

1. O prizmă de cuarţ sau de fluorid (transparentă pentru ultraviolete) şi o fantă care să permită selectarea unei radiaţii monocromatice, de o lungime de undă dorită.
2. Un set de discuri rotitoare cu deschideri triunghiulare, de diferite dimensiuni, care să permită modificarea intensităţii radiaţiei.
3. Un recipient evacuat, într-o oarecare măsură similiar cu tuburile electronice utilizate în aparatele de radio. între placa *P,* care emite fotoelectroni, şi grila *G,* se aplică un potenţial electric variabil. Dacă grila este încărcată negativ, iar diferenţa de potenţial între grilă şi anodă este egală sau mai mare decît energia cinetică a fotoelectronilor exprimată în electron-volţi, prin sistem nu va circula nici un curent. în caz contrar, vom avea un curent, intensitatea acestuia putînd fi măsurată cu galvanometrul *GN.* Folosind acest dispozitiv se poate măsura numărul şi energia cinetică a electronilor expulzaţi de lumina incidenţă, de orice energie şi lungime de undă (frecvenţă) dată.

Studiul efectului fotoelectric în diferitele metale a condus la formularea a două legi simple:
1. în cazul unei lumini de frecvenţă constantă şi de energie variabilă, energia fotoelectronilor rămîne constantă iar numărul lor creşte direct proporţional cu intensitatea luminii (fig. 7a).
2. în cazul în care frecvenţa luminii se modifică, nu are loc nici un fel de emisie de fotoelectroni pînă ce frecvenţa nu depăşeşte o anumită valoare v_0 care este diferită pentru diferitele metale. Deasupra acestei frecvenţe limită energia fotoelectronilor creşte liniar, fiind proporţională cu diferenţa dintre frecvenţa luminii incidente şi frecvenţa critică v_0 a metalului (fig. *1b).*

Aceste fapte bine stabilite nu puteau fi explicate pe baza teoriei clasice a luminii; ba, în unele privinţe, acestea erau în contradicţie cu

teoria. Se ştie că lumina este constituită din unde electromagnetice scurte, iar creşterea intensităţii luminii semnifică o creştere a forţelor electrice şi magnetice care se propagă în spaţiu. Deoarece electronii sînt expulzaţi de metal, probabil datorită acţiunii forţei electrice, energia lor ar urma să crească cu creşterea intensităţii luminii şi nu să rămînă constantă, aşa cum se întîmplă. Prin urmare, in cadrul teoriei clasice electromagnetice a luminii nu există nici o justificare ca să se găsească o dependenţă liniară a energiei fotoelectronilor de frecvenţa luminii incidente.

Pornind de la ideea lui Planck asupra cuantelor de lumină şi presupunînd existenţa lor reală ca pachete de energie independente, deplasindu-se prin spaţiu, Einstein a reuşit să dea o explicare perfectă a ambelor legi empirice ale efectului fotoelectric. El considera drept act elementar al efectului fotoelectric rezultatul ciocnirii dintre o cuantă singulară de lumină incidenţă şi unul dintre electronii de conducţie, purtători ai curentului electric în metal. în cadrul ciocnirii cuanta de lumină dispare, cedînd întreaga sa energie electronului de conducţie aflat la suprafaţa metalului. Dar, pentru a străbate suprafaţa şi a ieşi în spaţiul liber, electronul trebuie să cheltuiască o anumită cantitate de energie pentru a se elibera din atracţia ionilor metalici. Această energie, cunoscută sub numele de „lucru de ieşire[11], este diferită pentru diferitele metale şi este notată în mod curent cu simbolul *W.* Drept urmare, energia cinetică X, cu care electronul părăseşte metalul, este:

$$K = h(\nu - \nu_0) = k\nu - W$$

unde ν_0 este frecvenţa critică a luminii sub care

efectul fotoelectric nu are loc. Acest model explică simultan ambele legi deduse din experienţă. Dacă se menţine constantă frecvenţa luminii incidente, conţinutul în energie al fiecărei cuante rămîne şi el constant, iar mărirea intensităţii luminii conduce doar la o mărire corespunzătoare a numărului de cuante luminoase. în felul acesta, sînt expulzaţi mai mulţi fotoelectroni, fiecare din ei avînd aceeaşi energie, ca mai înainte. Formula care dă pe *K,* ca funcţie de v, explică graficele empirice arătate în fig. 7 *b,* care prevăd că panta liniei va fi aceeaşi pentru toate metalele şi că are o

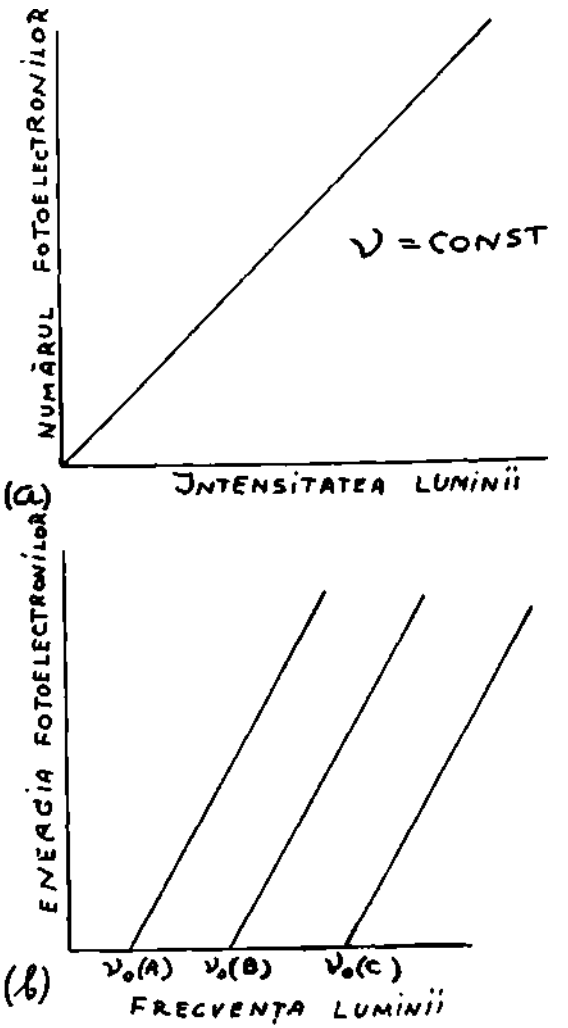


FIG. 7.

Legile efectului fotoelectric. în (a) este *reprezentată variaţia numărului de electroni în funcţie de intensitatea luminii monocromatice incidente. în* (b) este *reprezentată energia fotoelectronilor în funcţie de frecvenţa luminii monocromatice incidente pentru trei metale diferite: A, B* şi *C.*

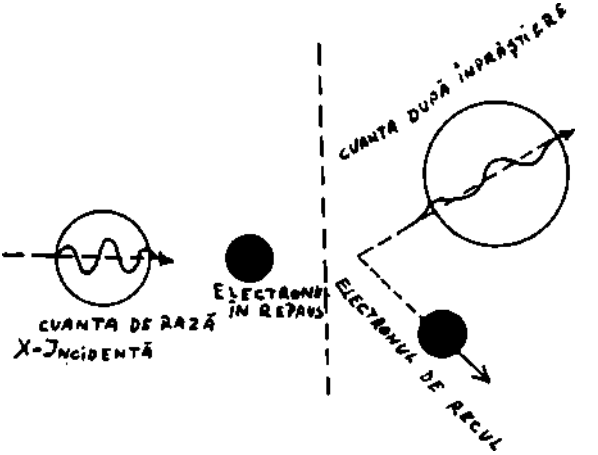


FIG. 8.
Difracţia Compton a razelor X. *Observaţi că după ciocnire lungimea de undă a cuantei razei* X creşte *datorită cedării de energie către electron.*

valoare numerică egală cu *h.* Această consecinţă a modelului lui Einstein a efectului fotoelectric este în ccmpletă concordanţă cu rezultatele experienţelor şi nu permite prin urmare nici o îndoială asupra realităţii cuantelor de lumină.

EFECTUL *COMPTON*

O experienţă importantă care demonstrează realitatea cuantelor de lumină a fost realizată în 1923 de un fizician american, *Arthur Compton,* care dorea să studieze ciocnirea unei cuante de lumină cu un electron aflat în mişcare liberă în spaţiu. Situaţia ideală ar fi să se poată observa astfel de ciocniri prin intersectarea unui fascicul de lumină cu un fascicul de electroni. Din păcate însă, numărul electronilor aflaţi chiar în cele mai intense fascicule de electroni aflate la dispoziţie este atît de mic încît ar fi de aşteptat secole pentru a înregistra o singură ciocnire. Compton a depăşit dificultatea, utilizînd raze *X* ale căror cuante poartă

cantităţi foarte mari de energie datorită frecvenţelor foarte înalte pe care le au. Energia de legătură a electronilor aflaţi în atomii elementelor uşoare este atît de mică în comparaţie cu energia purtată de fiecare cuantă de raze *X,* încît poate fi neglijată şi aceştia (electronii) pot fi consideraţi ca fiind nelegaţi şi practic liberi. Considerînd că o ciocnire liberă dintre o cuantă de lumină şi un electron are loc în acelaşi mod în care are loc ciocnirea între două mingi elastice, trebuie să ne aşteptăm că energia, şi prin urmare frecvenţa razelor *X* care au suferit împrăştierea, va scădea o dată cu creşterea unghiului de împrăştiere. Experienţele lui Compton (fig. 8) au fost în concordanţă completă cu această previziune teoretică şi cu formula dedusă pe baza conservării energiei şi a impulsului în ciocnirea a două sfere elastice. Această concordanţă a constituit o confirmare suplimentară a existenţei cuantelor de lumină.

N. BOHR SI ORBITELE CUANTIFICATE

Descoperirea faptului că lumina se propagă prin spaţiu şi poate fi emisă sau absorbită de materie numai sub forma unor porţii discrete de energie (cuante de lumină), porţii al căror conţinut în energie este strict definit de frecvenţele lor de oscilaţie, a avut o influenţă profundă asupra concepţiilor contemporane referitoare la structura însăşi a atomilor. Atunci cînd, în 1897, J.J. Thomson a dovedit, prin experienţe directe, că din atomi pot fi extrase particule uşoare încărcate negativ (electroni) şi în urmă rămîn reziduuri încărcate pozitiv (ioni), a devenit clar că atomii nu sînt aşa cum presupune semnificaţia greacă a numelor lor, adică unităţi constituente indivizibile ale materiei, ci, din contra, nişte sisteme complexe formate din părţi încărcate pozitiv şi negativ. Thomson considera atomul ca un fel de substanţă încărcată pozitiv, distribuită mai mult sau mai puţin uniform în întregul volum cu electroni încărcaţi negativ implantaţi în el, aşa cum sînt stafidele într-un cozonac rotund. Electronii sînt atraşi la centru de distribuţia de sarcină pozitivă şi se resping unii pe alţii în conformitate cu legea de

interacţiune electrică a lui Coulomb, iar starea normală a atomului se realizează atunci cînd aceste două seturi de forţe opuse se află în echilibru. Dacă atomul este

perturbat (sau, cum spun fizicienii, „excitat") prin ciocnirea cu un alt atom sau de un electron liber aflat în trecere, electronii lui interiori (la fel ca corzile într-un pian) încep să oscileze în jurul poziţiei lor de echilibru şi să emită lumină cu frecvenţe caracteristice, fapt care explică liniile spectrale observate. Atomii diferitelor elemente chimice posedă un număr diferit de electroni interiori, distribuiţi în mod diferit, şi având frecvenţe caracteristice diferite, şi, ca atare se deosebesc prin spectrele lor optice observate (fig. 9). Acceptîndu-se modelul atomului al lui Thomson, a fost posibil, cu ajutorul metodelor mecanicii clasice, să se calculeze distribuţia de echilibru a electronilor în corpul unui atom conţinînd un număr dat de electroni interni şi se aştepta ca şirul frecvenţelor de oscilaţii caracteristice calculate să coincidă cu liniile spectrale observate ale diferitelor elemente.

Thomson însuşi şi studenţii lui au efectuat calcule complicate pentru a găsi configuraţiile electronilor interatomici pentru care frecvenţele de oscilaţii calculate să corespundă cu frecvenţele observate în spectrele liniare ale diferitelor elemente chimice. Rezultatele au fost dezamăgitor de negative. Spectrele calculate teoretic pe baza modelului lui Thomson nu semănau întru nimic cu spectrele observate ale oricăruia dintre elementelele chimice. Devenea din ce în ce mai evident că era necesară o modificare revoluţionară a modelului clasic al atomului, a modelului lui Thomson. Acest punct de vedere era susţinut în mod deosebit de un tînăr fizician danez, Niels Bohr, care după ce a primit titlul de doctor de la Universitatea din Copenhaga, pentru o lucrare asupra teoriei trecerii particulelor încărcate prin materie, a venit în 1911 în Anglia, la Laboratorul Cavendish al Universităţii din Cambridge, pentru a se alătura grupului care lucra sub conducerea directorului acestuia, J.J. Thomson. Bohr argumenta că, deoarece lumina nu mai poate fi tratată ca fiind unde în propagare continuă, ci, din

contra, trebuie să fie dotată cu proprietăţile misterioase suplimentare, de emisie şi absorbţie de porţii discrete de energie, de mărime bine definită, rezultă că şi mecanica clasică newtoniană, pe care se baza modelul atomic al lui Thomson, trebuie să fie modificată în mod corespunzător. Dacă energia electromagnetică a luminii este „cuantificată" — adică

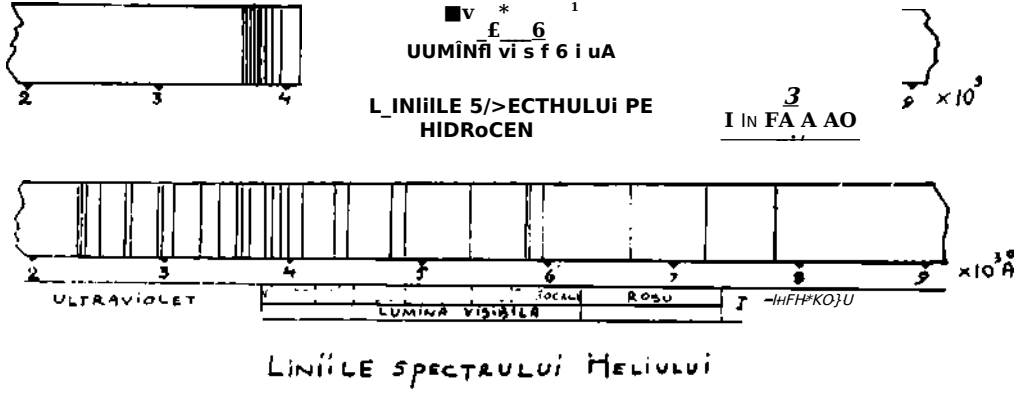


FIG. 9.
Comparați simplitatea spectrului hidrogenului, produs de mișcarea unui singur electron, cu complexitatea și cu lipsa aparentă de ordine, cauzată de cei doi electroni în spectrul heliului. Ambele spectre se *întind încă departe, în regiunile ultraviolete și infroroșii.*

restrînsă la porţii definite de una, două trei sau mai multe cuante de lumină *(kv,* 2Av, 3Av, etc.) — nu este oare rezonabil să presupunem că şi energia mecanică a electronilor atomici este cuantificată, adică că şi aceasta poate să ia doar un şir discret de valori, valorile intermediare fiind interzise de o lege încă nedescoperită a naturii? într-adevăr, ar fi ciudat dacă sisteme atomice construite în concordanţă cu legile mecanicii clasice newtoniene, aşa cum era modelul atomic al lui Thomson, ar emite şi absoarbe lumină sub forma unor cuante de lumină, ca ale lui Planck, care nu se pot încadra de loc în cadrul fizicii clasice!

TEORIA LUI RUTHERFORD ASUPRA NUCLEULUI ATOMIC

J.J. Thomson nu agrea aceste idei revoluţionare ale tînă- rului danez. O serie de discuţii ascuţite l-au forţat pe Bohr să se decidă să părăsească Cambridge şi să-şi petreacă restul său de timp ca colaborator străin într-un loc în care ideile sale, deocamdată vagi, asupra cuantificării mişcării electronilor în atomi să se lovească de o opoziţie mai puţin netă. Alegerea sa a căzut asupra Universităţii din Manchester, unde catedra de fizică era condusă de fiul unui fermier din Noua Zeelandă, fost student al lui Thomson, anume Ernest Rutherford, care pentru descoperirile lui ştiinţifice a căpătat titlul de Sir Ernest şi, mai tîrziu, de Lord Rutherford of Nelson. Atunci cînd Bohr a sosit la Manchester, Rutherford era în toiul studiilor sale epocale asupra structurii interne a atomilor, pe care îi bombarda cu proiectilele de energie înaltă, cunoscute sub numele de „particule a“, emise de elementele radioactive pe atunci recent descoperite. In studii anterioare, în cea mai mare parte efectuate la Universitatea McGill, în Canada, Rutherford a fost în stare să dovedească că particulele a emise de elementele radioactive nu sînt altceva decît atomi de heliu încărcaţi pozitiv,

mişcîndu-se cu viteze extraordinar de mari, neîntîlnite pînă atunci în fizică. Emisia particulelor a de către atomii grei instabili ai elementelor radioactive era adesea urmată de emisia de electroni (particule p) şi de radiaţie electromagnetică de înaltă frecvenţă (raze y) similară cu razele *X* obişnuite, dar avînd lungimi de undă mult mai scurte. Dacă se doreşte să se sfarme ceva, se alege desigur drept proiectil mai degrabă o minge solidă de fier decît una uşoară de ping-pong, şi Rutherford presupunea că particulele a masive vor pătrunde cu mult mai uşor în interiorul atomului decît uşoarele particule p. Aranjamentul experienţei era relativ simplu (fig. 10). O mică cantitate de material radioactiv, de exemplu *Ra,* care emitea particule a, era introdusă într-o gămălie şi amplasată la o anumită distanţă de o foiţă subţire *(F)* făcută din metalul care urma să fie studiat. Prin trecerea razelor printr-o diafragmă (Z>), se obţinea un fascicul îngust de particule a. Trecînd prin foiţă, particulele a se ciocneau cu atomii ce constituiau foiţa şi o fracţiune a particulelor suferea o împrăştiere în diferite direcţii, dincolo de foiţă. Căzînd pe un ecran fluorescent (5), amplasat în spatele foiţei, fiecare particulă a producea o mică scînteie (o scintilare) în punctul de incidenţă. Observînd aceste scintilaţii cu ajutorul unui microscop (Jf), se puteau număra particulele împrăştiate sub diferite unghiuri faţă de direcţia iniţială, exact aşa cum în tragerile la ţintă cu arma de foc se pot măsura devierile găurilor gloanţelor de la centrul ţintei. In experienţele sale, Rutherford a observat că în timp ce majoritatea particulelor treceau prin foiţă, aproape fără vreo deviere, formînd un spot luminos (centrul ţintei) în faţa orificiului din diafragmă, unele dintre ele erau deviate sub unghiuri remarcabil de mari. Unele dispozitive experimentale oarecum diferite au arătat că în puţine cazuri particulele a sînt respinse aproape înapoi la sursă.

Această observaţie se afla în contradicţie

directă cu ceea ce era de aşteptat pe baza modelului atomic al lui Thomson. Trecînd prin atom, particula a incidenţă poate fi deviată de la direcţia sa iniţială, fie datorită atracţiei electrice a electronilor intraatomici, fie datorită repulsiei electrice a sarcinii pozitive distribuite. Fără discuţie, interacţiunea cu electronii, care sînt cam de 10.000 de ori mai uşori decît particulele a, nu putea să producă o deviere cit de cît sensibilă a mişcării particulelor a. Pe de altă parte, materialul încărcat pozitiv al modelului lui Thomson era prea rar distribuit în întregul corp al atomului pentru a fi în stare să cauzeze o deviere apreciabilă a particulelor a

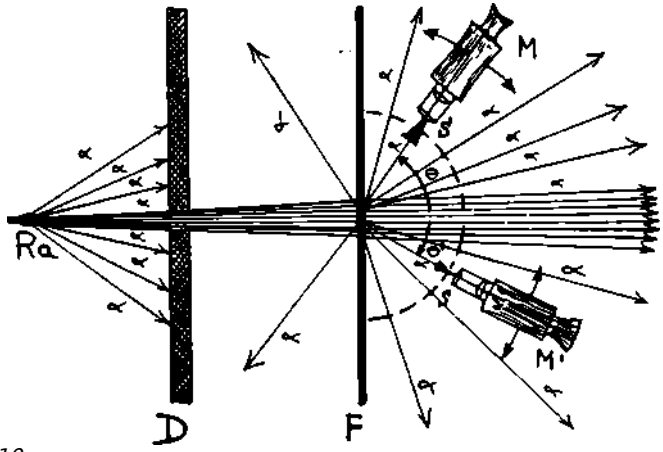


FIG. 10.
Aparatul lui Rutherford pentru studierea dependenţei unghiulare a difuziei **a.**

ce treceau prin el. într-adevăr, dacă aruncăm o minge de fier intr-o bucată de cărbune, aceasta va ricoşa sub un unghi apreciabil, poate chiar sfărîmînd cărbunele în cîteva bucăţi. Dar, dacă pisăm aceeaşi bucată de cărbune într-o pulbere fină şi aruncăm aceeaşi minge prin norul de cărbune rezultat, mingea va trece prin acesta fără nici un fel de deviaţie. Devierile foarte mari observate în experienţele de împrăş- tiere, ale lui Rutherford, au

dovedit în mod hotărît că sarcina pozitivă (asociată cu cea mai mare parte a masei) a atomului nu este distribuită în întreg corpul acestuia, ca în exemplul de mai sus al norului de praf de cărbune, ci este concentrată, ca şi piesa solidă de cărbune, într-un mic sîmbure dur — nucleul. Dependenţele observate experimental ale numărului de particule a deviate în diferitele direcţii, în funcţie de unghiul de difuzie, erau în concordanţă perfectă cu formulele teoretice pentru difuzia unor particule care se mişcă într-un cîmp de forţe centrale repulsive, a căror intensitate este invers proporţională cu pătratul distanţei.

In felul acesta a luat fiinţă modelul atomic al lui Rutherford. Acest model, cu electronii lui negativi mişeîndu-se liber în spaţiu în jurul unor nuclee grele, încărcate pozitiv, aflate în centru, semăna oarecum cu sistemul solar. Deoarece legea lui Coulomb a atracţiei electrice este din punct de vedere matematic identică cu legea gravitaţiei a lui Newton (ambele forţe fiind invers proporţionale cu pătratul distanţei), rezultă că electronii atomici se mişcă în jurul nucleului după nişte orbite circulare sau eliptice, în acelaşi mod cum se mişcă planetele în jurul Soarelui.

Există însă o mare diferenţă, care constă în faptul că în timp ce Soarele şi planetele sînt electric neutre, nucleul atomic şi electronii sînt purtătoare de sarcini electrice importante. Se cunoaşte foarte bine că sarcinile electrice aflate în oscilaţie dau naştere la unde electromagnetice divergente. Modelul atomic al lui Rutherford poate fi considerat ca o staţie de radioemisie miniaturală, lucrînd pe frecvenţe ultra- înalte. Folosind teoria clasică a emisiei electromagnetice, se poate calcula uşor că undele de lumină emise de electronii aflaţi în mişcare circulară în jurul nucleului atomic vor lua cu ele în spaţiu întreaga energie a electronului, în circa o sutime de milionime de secundă. Pierzîndu-şi întreaga energie, electronii atomici trebuie să cadă pe nucleu şi atomul încetează să

mai existe!

Vorbind riguros, astfel de pierderi de energie sînt de aşteptat şi în cazul planetelor sistemului solar. în conformitate cu teoria relativităţii generale a lui Einstein, oscilaţia maselor gravifice conduce de asemenea la emisia de aşa-numite „unde gravifice[11], care iau cu sine energie. Dar, datorită valorii mici a constantei lui Newton, pierdeiile de energie ale planetelor prin emisia gravifică sînt extrem de mici şi de la formarea lor, acum circa patru sau cinci miliarde de ani, planetele n-au putut să piardă mai mult de cîteva procente din energia lor iniţială.

CUANTIFICAREA UNUI SISTEM MECANIC

Ce este de făcut însă în cazul atomilor alcătuiţi potriv.'t cu‘ modelul lui Rutherford? După cum am arătat, teoretic aceştia nu pot exista mai mult de o sutime de milionime de secundă, în realitate însă ei există pentru eternitate. Această problemă i se punea şi tînărului Bohr la sosirea lui la Manchester.

Factorul principal în dezvoltarea ştiinţei îl constituie tocmai înlăturarea unor astfel de contradicţii între concluziile teoretice pe de o parte şi faptele observate sau, uneori, chiar bunul simţ pe de alta. Faptul că A.A. Michelson nu a putut detect a mişcarea Pămintului printr-un eter luminifer[**], l-a condus pe Einstein la formularea teoriei relativităţii care a modificat noţiunile noastre bazate pe bun simţ despre spaţiu şi timp şi a provocat modificări profunde în fizica clasică. In mod asemănător, Catastrofa ultravioletă despre care am vorbit în capitolul anterior, l-a condus pe Planck la ideea absolut nouă a cuantelor de lumină.

Imposibilitatea teoretică a modelului Iui Rutherford, verificat experimental, era în

** Vezi Bernard Jaffe, *Michelson şi viteza luminii,* Editura Ştiinţifică, Bucureşti, 1967.

concordanţă cu sentimentul ascuns al lui Bohr că, dacă energia electromagnetică este cuantificată, este necesar să fie cuantificată şi energia mecanică, deşi poate într-un mod oarecum diferit. Intr-adevăr, atunci cînd un atom excitat emite o cuantă de lumină cu energie Av, energia sa mecanică trebuie să scadă exact cu aceeaşi cantitate. Deoarece spectrele atomice sînt formate dintr-o serie discretă de linii net definite, diferenţele de energie dintre stările diferite posibile ale unui atom trebuie să posede de asemenea valori net definite şi în acelaşi mod trebuie să fie şi energiile absolute ale acestor stări înseşi. Aceasta conduce la ideea că mecanismul atomic este oarecum similar cu cutia de viteze a unui automobil. Ea poate fi făcută să meargă în viteza 1, a 2-a, a 3-a etc. dar niciodată în viteza 1 — sau 3 — ...

Fie E_r, E_2, E_3, E_t etc. energiile posibile ale diferitelor stări ale unui atom, aranjate în ordine crescătoare (fig. 11). Un atom posedă totdeauna o oarecare energie internă, dar atunci cînd energia sa a coborît la nivelul minim posibil, E_r, nu mai există nici o energie disponibilă pentru emisia unei cuante de lumină. Acest nivel *E^este starea fundamentală* sau *normală a* atomului în care acesta poate rămîne la infinit. Ea este cunoscută sub numele de „energia de zero“ şi, în cazul unui oscilator, este de l/2Av. Să presupunem acuma că atomul este adus într-o stare oarecare excitată, cu o energie mai înaltă, E_n. Această energie poate fi atinsă, de exemplu, supunînd gazul la o temperatură foarte înaltă, ca de exemplu în atmosfera Soarelui, unde atomii sînt aduşi în stări excitate datorită ciocnirilor termice violente dintre ei. O altă cale de excitare a atomilor este trecerea unei descărcări electrice de înaltă tensiune printr-un tub de sticlă umplut cu un gaz rarefiat††. Atomii

†† Este necesar să se utilizeze un gaz rarefiat pentru a permite electronilor să-şi recîştige energia pierdută în fiecare ciocnire, dîndu-le un interval suficient de timp între două ciocniri succesive pentru a fi accelerați în

sînt excitaţi prin şocul electronilor rapizi ce zboară prin tub de la electrodul negativ (catod) la cel pozitiv (anod). Astfel de dispozitive în care gazul devine luminos, ca urmare a descărcării electrice de înaltă tensiune, au fost cunoscute iniţial sub numele de tuburi Geissler, după numele inventatorului lor, Heinrich Geissler. Le vedeţi astăzi peste tot în reclamele luminoase de pe stradă şi în alte dispozitive de iluminare.

Atunci cînd atomul este excitat la starea de energie *m, E_m,* el poate să revină la o stare oarecare cu energie mai joasă, *E_n (n < m),* eliberînd diferenţa de energie sub forma unei cuante de lumină. Astfel, putem scrie:

$$n = E_m E_n$$

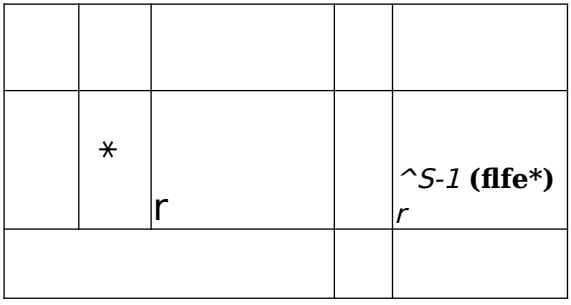
sau

$$\nu_{m,n} = \frac{E_m - E_n}{h}.$$

Cei doi indici ai lui ν_{m_n} arată că această frecvenţă particulară din spectru corespunde la tranziţia de la starea cuantică de mişcare *m,* la starea cuantică *n.*

Modelul emisiei unei cuante de lumină ca rezultat al tranziţiei atomului de la o stare energetică mai înaltă la una mai joasă are o consecinţă foarte interesantă. Să presupunem că în spectrul unui element oarecare observăm două linii care corespund tranziţiei de la starea cuantică 6, la a 4-a şi de la a 4-a, la a3-a (partea stîngă din fig. 11). Atunci

cîmpul electric aplicat. La presiunea normală atmosferică gazele nu conduc electricitatea şi dacă tensiunea devine foarte înaltă are loc o străpungere bruscă sub forma unui arc.



Ei----------

FIG. II.
Explicarea lui Bohr a regulei lui Rydberg.

este posibil ca tranziţia să aibă loc de-a dreptul de la starea a 6-a, la a 3-a şi vom găsi o linie cu frecvenţa

$$\nu_{6,3} = \nu_{«,4} + \nu_{4.3}$$

Situaţia arătată în partea dreaptă a aceleiaşi figuri este cea opusă. Din faptul că observăm frecvenţele $\nu_{6>2}$ şi ν_{Si3} rezultă că putem de asemenea observa şi frecvenţa

$$\nu_{3,2} = \nu_{5,3} \qquad \nu_{5,2}$$

Spectroscopistul elveţian W. Ritz a descoperit această lege a *Adunării şi Scăderii,* pe cînd Niels Bohr era încă un băiat de şcoală. Insă în spectroscopia precuantică, regula lui Ritz ca şi alte regularităţi similare numerice dintre frecvenţele observate constituiau doar nişte şarade enigmatice care nu puteau fi explicate în mod satisfăcător. **Ele** au fost însă foarte folositoare lui Niels Bohr în încercarea sa de a rezolva problema emisiei şi absorbţiei de lumină de către atomi, prin introducerea ideii de stări cuantice discrete ale electronilor atomici.

Bohr a ales pentru primele sale studii atomul de hidrogen, cel mai uşor, şi atomul presupus a fi construit cel mai simplu, care era de asemenea cunoscut ca posedînd un spectru foarte simplu. In anul 1885, un învăţător elveţian, J.J. Bal- mer, care era foarte interesat de regularităţile liniilor spectrale atomice, a descoperit că frecvenţa părţii vizibile a spectrului hidrogenului poate fi reprezentată cu mare precizie de o formulă foarte simplă. Frecvenţele acestor linii, arătate în partea de sus a fig. 9 (unde ele sînt reprezentate în lungimi de undă X — c/v), sînt date în tabelul următor‡‡:

Hv.----= 4,569 x ÎO^{14}^^{1}

*H$*-—*$v_2$ = 6,168 X ÎO^{14}^^{1}

Z/y----->v_3 = 6,908 X IO^{14}*’^{1}

H8-----= 7,310 x IO^{14} s-^{1}

După cum cititorul poate verifica el însuşi, aceste valori pot fi obţinute din formula

$v_{m,n}$ = 3,289 x 10^{18}({- în care *m* ia valorile§§ *** †††: 3, 4, 5, 6. Pentru *n* mai mari, frecvenţele intră în regiunea ultravioletă şi liniile devin din ce în ce mai îndesate, convergînd spre valoarea

$$3{,}289 \times IO^{18} \times \frac{-}{4} = 6{,}225 \times ÎO^{11}{}^{\wedge}{}^{1}$$

în modelul lui Bohr asupra relaţiilor dintre cuanta de lumină emisă $Av_{m,n}$ şi stările energetice

---

‡‡s^{-1} semnifică „pe secundă"; cm^{-1} semnifică „pe centimetru"; mere lei^{-1} semnifică „mere pe lei".

§§ Coeficientul numeric din formulă este adesea notat cu litera *R*

***şi cunoscut ca constanta lui Rydberg deşi ar trebui să fie numită

†††mai corect constanta lui Balmer.

(sau nivelele) E_m şi E_n ale atomului, formula lui Balmer spune că linia m a seriei se datorează tranziţiei de la starea m, a unui atom de hidrogen excitat, la starea a 2-a (deoarece $4 = 2^2$). Dacă în locul lui

$$\frac{1}{4} \sim \frac{1}{2^2}$$

se înlocuieşte în formula lui Balmcr

$$\frac{1}{l^2} = -$$

şi se pune $m = 2, 3, 4$, etc., se obţine o secvenţă de linii care se duc departe în regiunea ultravioletă, care au fost găsite realmente de Theodore Lyman. Pe de altă parte, dacă se schimbă primul termen al formulei lui Balmer cu

$$\frac{11}{9} = \frac{11}{3^2} \text{ sau } \frac{11}{16} = \frac{11}{4^2},$$

se obţin frecvenţele de lumină care cad departe în regiunea infraroşie şi care au fost găsite de Friedrich Paschen şi respectiv de Frederick Brackett. Rezultă că stările cuantice mecanice trebuie să arate aşa cum sînt figurate în fig. 12, care indică de asemenea tranziţiile care rezultă în emisia seriilor Lyman, Balmer, Paschen şi Brackett.

In felul acesta, fiecare linie a spectrului este caracterizată prin doi indici, m şi n, corespunzători celor două nivele cuantice între care are loc tranziţia (pornind de la m şi terminînd la n). Deoarece energia cuantei de lumină este egală cu diferenţa de energie dintre cele două stări, de la care se pleacă şi la care se ajunge, formula generalizată a lui Balmer trebuie rescrisă astfel:

sau

I Rh| f Bh| ^{h} ''***m,n =***

în care cantităţile din cele două paranteze reprezintă nivelele de energie E_m şi E_n- Explicarea faptului că aceste energii sînt scrise ca mărimi negative constă în faptul că în mod convenţional energie zero se atribuie acelei stări a sistemului

în care toate părţile acestuia sînt la distanţe infinite unele de altele. In felul acesta, dacă energia sistemului este pozitivă, el nu mai constituie un întreg şi toate componentele sale se îndepărtează unele de altele. Intr-un sistem stabil, ca cel al planetelor, care se rotesc în jurul Soarelui sau ca acela al electronilor, care se rotesc în jurul nucleului atomic, energia este negativă şi pentru a separa părţile este necesară o cantitate suplimentară de energie, din afară.

Pentru a explica valorile care rezultă potrivit formulei de mai sus pentru energiile diferitelor stări ale atomului de hidrogen, Bohr a făcut două presupuneri simplificatoare:

Prima: Atomul de hidrogen fiind cel mai simplu atom din întregul sistem periodic al elementelor, conţine *doar un* electron.

A doua: Diferitele stări cuantice ale atomului de hidrogen corespund la mişcarea acestui electron pe *orbite circulare* cu raze diferite. Acceptînd aceste presupuneri, căpătăm posibilitatea determinării orbitelor cuantice ale electronilor din relaţia:

$$E_n = -\frac{Rh}{n^2}$$

Să considerăm mişcarea pe orbită a unui electron în starea de excitaţie a n-a, a unui atom de hidrogen, şi să notăm cu r_n raza şi cu v_n viteza orbitală a electronului în starea a n-a. Masa electronului este m_e, sarcina sa $-e$, iar sarcina nucleului (în cazul acesta un proton) este -f-e. Condiţia ca electronii să se mişte pe o orbită circulară este ca forţa de atracţie electrostatică — — să fie echilibrată de forţa centrifugă + — • r- ’

Din

$$\frac{e^2}{r^2} \qquad \frac{m_e v^2}{r} _ Q$$

rezultă

$$V = \frac{e}{Vm_e r}$$

care dă viteza *v* a electronului necesară pentru mişcarea sa pe un cerc de rază *r.* Conform cu această ecuaţie din mecanica

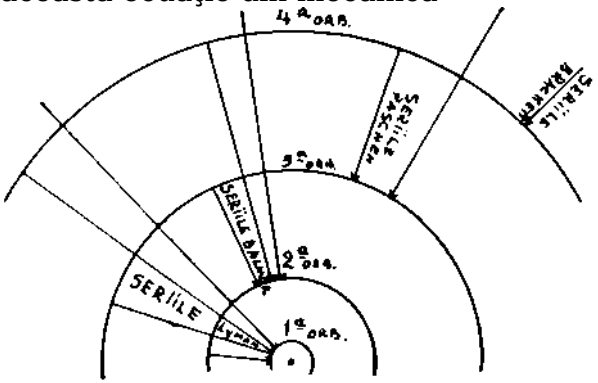


FIG. 12.
Modelul iniţial al lui Bohr pentru atomul de hidrogen.
Seriile Lyman sînt amplasate in regiunea ultravioletă, iar seriile Balmer în partea vizibilă a spectrului.
Seriile Paschen şi Brackett în zona infraroşie.

clasică, electronul se poate mişca pe *orice* orbită circulară, cu condiţia ca el să posede viteza necesară.

Care este condiţia cuantică, care selectează numai orbitele cu energiile $E_n = — Rh/n^2$*?*

In teoria cuantică a radiaţiei, expusă în paragraful precedent, s-a stabilit că o oscilaţie cu o frecvenţă oarecare v poate purta numai energia uneia, a două, a trei, sau a mai multe cuante de lumină, în aşa fel încît $E_n = nhv$ (n = 1, 2, 3 etc).

Putem rescrie formula, în forma:

$$= — nh$$

care semnifică faptul că cantitatea *E/* v poate fi doar un multiplu întreg al constantei cuantice *h.*

Putem menţiona aici că dimensiunea fizică a lui *h* este:

$$|\text{ acţiunea }| = -\frac{\text{ergie 1}}{|\text{ frecvenţă }|} \blacksquare = \frac{\text{1 masa 1 1 viteză}}{|\text{frecvenţă}|} =$$

$$= \frac{\text{I masă I-I lungime I}^2 \text{ .}}{|\text{ timp }|^{-1}\text{-1 timp }|^2} \cdot \frac{\text{I lungime |}}{|\text{ timpi}} \text{ .}$$

$$= |\text{ masă }| \bullet |\text{ viteză }| \blacksquare |\text{ lungime}|.$$

Produsul dintre *masa* unei particule, *viteza* acesteia şi *distanţa* pe care o parcurge este o cantitate bine cunoscută, numită *acţiune,* şi joacă un rol important în mecanica analitică clasică. De exemplu, „principiul minimei acţiuni", formulat de matematicianul francez P.L.M. de Maupertuis, in 1747, afirmă că o particulă supusă unor forţe mecanice se va deplasa din punctul *A* în punctul *B* pe acea traiectorie, dintre toate traiectoriile posibile între aceste două puncte, pentru care „acţiunea totală" de la *A* la *B* va fi fie cea mai mică, fie cea mai mare. Legea lui Planck a cuantelor de lumină adaugă o condiţie suplimentară la principiul lui Maupertuis: *acţiunea totală trebuie să fie totdeauna un multiplu întreg de h.*

In cazul unei traiectorii circulare închise a electronului în jurul nucleului condiţia cuantică va cere ca produsul dintre masa electronului, viteza acestuia şi distanţa parcursă într-o rotire să fie un multiplu întreg de *h.* Astfel, pentru a n-a orbită a lui Bohr, rezultă:

$$m_e \text{-} v_n \text{-} 2\pi r_n = nh$$

$$m_e \blacksquare \bullet 2\pi r_n = 2neV\, m_e \bullet \mathrm{Vr_n} = nh$$

sau

$$4\pi^2 r^2 e^2 z n$$

Vom calcula acuma energia totală E_n, a unui electron de pe orbita a n-a, care este suma energiei cinetice K şi a celei potenţiale U. Folosind expresia pentru viteză $v = e^{\wedge} m_e r$ dată mai înainte şi ţinînd seama că energia potenţială a două sarcini electrice 4-e şi — e distanţate la r este + e[a]/r, scriem:

$$E_n = K_n\ U_n = — \frac{m_e}{2} \bullet \text{----------} 1 \text{---} =$$

$$2\ r_n \qquad \boldsymbol{r_n} \qquad \sim \boldsymbol{r_n}$$

Înlocuind in această expresie pe r_n cu expresia din formula de mai sus, obţinem:

$$r, \qquad \frac{i' x^2 e^i m_e}{h^2\ n^2}\ 1$$

care coincide cu expresia empirică

$$F - \frac{Rh}{\vec{n}^l}$$

obţinută din formula lui Balmer, dacă punem:

$$\sim h^3$$

Atunci cînd Bohr a înlocuit în această expresie valorile numerice pentru e, m_e şi k, el a obţinut R = 3,289 X IO[15]»"[1], care este exact valoarea empirică obţinută pentru R din observaţiile spectroscopice. In felul acesta, problema cuantificării unui sistem mecanic a fost rezolvată cu succes.

ORBITELE ELIPTICE ALE LUI SOMMERFELD

Lucrarea iniţială a lui Bohr asupra atomului de hidrogen a fost curînd urmată de alta, a unui fizician german, Arnold Sommerfeld, care a extins ideile lui Bohr pentru cazul orbitelor eliptice. Aşa cum se arată în fig. 13, mişcarea unei particule în

cîmpul unei forţe centrale este în general caracterizată prin două coordonate (polare), distanţa *r* a particulei la centrul de atracţie şi unghiul poziţiei <I> (azimutal) faţă de axa mare a elipsei; *r* are valoarea maximă cînd = 0, scade la valoarea minimă pentru <I> = tc şi creşte din nou la valoarea sa maximă, pentru <I> = 2TC. Astfel, spre deosebire de orbitele circulare ale lui Bohr, unde *r* rămîne constant şi se modifică doar <I>, mişcarea pe orbitele eliptice ale lui Sommerfeld este caracterizată prin două coordonate independente *r* şi <b. De aici rezultă că fiecare orbită eliptică cuantificată trebuie să fie caracterizată prin *două* numere cuantice: numărul cuantic azimutal n© şi cel cuantic radial n_T. Aplicînd condiţiile de cuantificare ale lui Bohr, potrivit cărora acţiunile totale mecanice pentru componentele mişcării *azimu-*

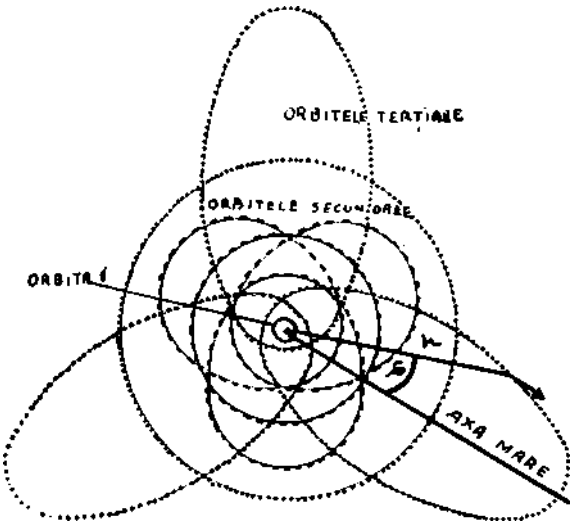


FIG. 13.
Orbite cuantificate circulare şi eliptice în atomul de hidrogen. Prima orbită circulară (linia plină) corespunde energiei celei mai scăzute a electronului. Următoarele patru orbite, una circulară şi trei eliptice (linii întrerupte), corespund la aceeaşi energie, care e mai înaltă decît aceea a primei orbite. Următoarele nouă orbite (linii punctate), dintre care sînt arătate în figură doar patru, corespund la o energie şi mai înaltă (aceeaşi, pentru toate cele nouă orbite).

tale şi radiale *n<ş>* şi n_r trebuie să fie multipli întregi de *k,* Sommerfeld a obţinut pentru energia

$$E_{n_\Phi, n_r}$$

mişcării eliptice cuantificate formula:
Este exact aceeaşi formulă ca şi formula iniţială a lui Bohr, cu singura deosebire că numitorul, în loc să fie pătratul unui număr întreg, este pătratul sumei a două numere întregi arbitrare, care desigur este el însuşi un număr întreg arbitrar. Punînd $n_r = 0$, obţinem ca un caz particular orbitele circulare ale lui Bohr. Dacă n_T *=/=(),* obţinem orbite eliptice cu diferite grade de elipticitate. Cu

toate formele lor d'ferite însă, energiile tuturor orbitelor care corespund la aceeaşi sumă re® + re,, sînt exact aceleaşi. Suma re® + re_r, notată de regulă simplu cu re, este cunoscută ca *numărul cuantic principal.*

E cazul să precizăm aici că tratarea relativistă a atomului de hidrogen dă rezultate uşor diferite, din cauză că masa unei particule potrivit mecanicii lui Einstein creşte cu viteza acesteia, tinzînd spre o valoare infinită cînd viteza se apropie de viteza luminii, *c.* Intr-adevăr, dacă m_0 este „masa de repaus[11] a unei particule (practic, masa acesteia cînd se mişcă cu mult mai lent decît lumina), masa la o viteză mult mai mare *v* este dată de

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

şi tinde spre infinit, cînd *v* se apropie de *c.* Deoarece in mişcarea eliptică viteza se modifică în diferitele puncte ale traiectoriei (legea a doua a lui Kepler), masa electronului variază şi dînsa, şi calculele devin ceva mai complicate. In cazul acesta, energiile diferitelor orbite corespunzătoare aceluiaşi număr cuantic principal devin uşor diferite şi fiecare nivel singular se scindează în cîteva componente amplasate foarte apropiat unele de altele. Corespunzător, fiecare linie spectrală singulară, care rezultă din tranziţiile dintre două stări cuantice caracterizate prin două numere cuantice principale *m* şi re se scindează într-un număr de componente. Această multiplicare, care poate fi observată numai utilizînd un analizor spectral cu o putere de rezoluţie foarte mare, este cunoscută ca „structura fină[11] a liniilor spectrale. Diferenţele de frecvenţă între componentele de structură fină depind de aşa-numita „constantă a structurii fine[11] a dată de

$$\pounds^2 \quad ^1$$
$$\sim \overline{hc} \sim \overline{137}$$

Această cantitate este o mărime fără dimensiuni, fiind un număr pur, şi valoarea ei mică explică apropierea componentelor de structură fină. Dacă *c* ar fi infinită, a ar fi zero şi nu s-ar observa nici un fel de structură fină.

O altă rafinare a teoriei iniţiale a lui Bohr vine de la luarea în considerare a faptului că orbitele eliptice ale lui Sommer- feld nu sînt obligatoriu amplasate în acelaşi plan, ci pot avea diferite orientări în spaţiu, făcînd ca atomii cu mulţi electroni care se mişcă de-a lungul a multor orbite diferite să nu apară ca nişte discuri plate (ca în cazul sistemului solar), ci mai degrabă ca nişte corpuri tridimensionale.

INSTITUTUL LUI BOHR

La întoarcerea triumfală a lui Bohr în Danemarca, Academia Regală Daneză de Ştiinţe i-a acordat sprijin financiar pentru a-şi construi un institut propriu de cercetări atomice şi pentru a asigura burse pentru tinerii fizicieni teoreticieni din întreaga lume care ar dori să vină la Copenhaga să lucreze cudînsul. In felul acesta a apărut la adresa Blegdamsvej‡‡‡ 15, o clădire a Institutului deFizicăTeoretică al Universităţii, iar uşă în uşă cu acesta, casa directorului, pentru Bohr şi familia sa. Nu este ne la locul lui să menţionăm aici că Academia Regală Daneză de Ştiinţe are principalele sale surse financiare la fabricile de bere Carlsberg, care produc cea mai bună bere din lume. Cu mulţi ani înainte, întemeietorul fabricii de bere a donat veniturile acesteia Academiei, pentru a fi utilizate în dezvoltarea ştiinţei, cu menţiunea în actul de donaţie ca palatul pe care bătrînul Carlsberg şi-l construise pentru sine, în mijlocul proprietăţii sale,

‡‡‡ Astăzi, adresa oficială a Institutului a fost schimbată, la Blegdamsvej 17.

să fie utilizat ca reşedinţă pentru cei mai cunoscuţi oameni de ştiinţă danezi în viaţă. La începutul deceniului al 3-lea, Bohr s-a mutat cu familia sa în palat, cînd el devenise celebru, iar cel care ocupa palatul Carlsberg murise. în fig. 14 este redată o schiţă a unei cravate care a fost făcută la aniversarea binecunoscutului biochimist danez Linderstrom Lang, care timp de mulţi ani a fost directorul laboratorului de cercetări al fabricii de bere Carlsberg şi care arată o sticlă de bere Carlsberg. Ea constituie un simbol pentru toţi aceia care au lucrat cu bursă Carlsberg în Institutul lui Bohr.

FIG. 14.
Berea Carlsberg şi consecinţele sale.

Institutul Bohr a devenit repede centrul mondial al fizicii cuantice şi, pentru a parafraza pe vechii romani, „toate drumurile duceau la Blegdamsvej 17“. Institutul era plin de tineri fizicieni teoreticieni şi, în general, de idei noi cu privire la atomi, la nucleele atomilor şi la teoria cuantică. Popularitatea institutului se datora atît geniului directorului său, cît şi inimii acestuia calde, se poate spune chiar părinteşti. în timp ce alt geniu al

acestei epoci, Albert Einstein, de asemenea un om foarte cald, nu a format niciodată ceea ce se cheamă „o şcoală[11] şi a lucrat, de regulă, cu un singur asistent, pentru a avea cu cine discuta, Bohr a crescut mulţi „copii[11] ştiinţifici. Aproape fiecare ţară în lume are fizicieni care spun cu mîndrie: „Am lucrat cu Bohr“. Vizitînd odată Universitatea din Gottingen, Bohr a întîlnit un tînăr fizician german, Werner Heisenberg, (vezi capitolul V), care, la virsta de 25 de ani, a realizat importanţi paşi înainte în domeniul mecanicii cuantice. Bohr i-a propus lui Heisenberg să vină la Copenhaga, să lucreze împreună. în ziua următoare, la un dineu dat în onoarea lui Bohr la Universitate, doi poliţişti germani în uniformă au întrerupt masa şi unul din ei, punînd mîna pe umărul lui Bohr, a anunţat: „Sînteţi arestat sub învinuirea de răpire de copii mici!“ Desigur, „poliţiştii[11] erau doi studenţi costumaţi, şi Bohr nu a fost niciodată dus la închisoare; dar Heisenberg a mers la Copenhaga ! Mulţi fizicieni teoreticieni din Europa şi America s-au dus la Copenhaga pentru un an, pentru doi ani sau mai mulţi şi pe urmă reveneau mereu, mereu în anii următori: P.A.M. Dirac (vezi capitolul VI) şi N.F. Mott (actualmentedirectorul Laboratorului Cavendish) din Anglia; H.A. Kramers şi H. Casimir din Olanda; Wolfgang Pauli (capitolul III), Werner Heisenberg (capitolul V) şi M. Delbruck (vezi Apendicele), şi Cari von Weizsăcker din Germania; L. Rosenfeld din Belgia; S. Rosseland din Norvegia; O. Klein din Suedia; G. Gamow şi L. Landau din Rusia; R.C. Tolman, J.C. Slater şi J. Robert Oppenheimer din Statele Unite; Y. Nishina din Japonia; etc. Ei mergeau pentru un sejur mai lung, pentru o scurtă vizită sau exact pentru conferinţele care aveau loc în fiecare primăvară.

Unul din cei mai pitoreşti vizitatori a fost Paul Ehrenfest, profesor la Universitatea din Leyden. Ehrenfest s-a născut la Viena, în 1880, a studiat sub conducerea lui Boltzmann, căpătînd titlul de doctor în ştiinţe în 1904. In acel an el s-a căsătorit

cu o matematiciană rusă, Tatiana, şi s-a mutat la Petersburg (azi Leningrad) unde a rămas pînă în 1912, cînd a fost invitat la catedra de fizică a Universităţii din Leyden. Aici el a rămas pînă la moartea sa, în 1933. Lucrările sale de mecanică statistică şi de teorie a invarianţilor adiabatici sînt prea abstracte şi complicate pentru a fi descrise în această lucrare, dar el a fost un membru nepreţuit al tuturor întîl- nirilor ştiinţifice datorită cunoştinţelor lui largi şi adinei de fizică, precum şi structurii critice a inteligenţei sale care-1 ajutau să găsească golurile (uneori pe cele rele) în noile teorii propuse. El obişnuia să-şi spună singur „dascăl" şi mulţi dintre studenţii săi au obţinut rezultate foarte bune in activitatea lor ştiinţifică.

Odată®, pe cînd călătoream din Danemarca în Anglia, prin Olanda, Ehrenfest m-a invitat să rămîn la dînsul pentru cîteva zile. El m-a aşteptat la gară, m-a condus acasă şi după ce mi-a arătat camera de musafiri în care urma să dorm, mi-a spus: „Să nu fumezi aici. Dacă doreşti să fumezi, te duci în stradă". Pe vremea aceea fumam cel puţin tot aşa de mult ca şi astăzi, şi am evitat regula impusă de dînsul, suflînd fumul de ţigară în uşile de tiraj ale marei sobe olandeze din camera mea. El detesta orice fel de miros, cu excepţia aceluia de aer proaspăt. într-o zi, studentul său Casimir (actualmente directorul ştiinţific al Companiei de radio Philips) avea o întîlnire cu dînsul, într-o după masă. înainte de întîlnire, Cas (o prescurtare de la Casimir care în olandeză înseamnă „brînză") s-a dus la un frizer să se tundă şi a observat prea tîrziu că frizerul îi freca părul blond cu o loţiune. El a trebuit să-şi petreacă cele două ore înainte de întâlnirea cu Ehrenfest parcurgînd străzile pentru ca mirosul loţiunii să dispară. Şi, desigur, nimeni n-ar fi îndrăznit să-i spună lui Ehrenfest că băutura olandeză este mai bună (sau mai rea) ca ginul englezesc!

Intr-o piesă de teatru de amatori, celebră printre oamenii de ştiinţă, Faust-ul de la Blegdamsvej

(reprodus în traducere în Apendicele acestei cărţi), Ehrenfest juca rolul lui Faust pe care Mefisto (Pauli) îl seduce, arătîndu-i o imagine a lui Gretchen (Neutrino).

Personalitatea lui Niels Bohr şi bucuria de a trăi şi a lucra în institutul său sînt încă vii în amintirile mele din anul 1928 şi pînă la moartea acestuia, şi sper că una sau două anecdote vor reda ceva din farmecul acestui om deosebit de remarcabil.

După ce am trecut cu succes cuprinzătorul examen de la Universitatea din Leningrad, în primăvara anului 1928

• Povestindu-şi propriile amintiri, autorul se va îndepărta de la convenţia academică de modestie şi va scrie la persoana întîia. am întreprins diligenţele necesare pentru a căpăta permisiunea guvernului sovietic de a petrece două luni la Şcoala de vară a Universităţii din Gottingen...

Prezentînd recomandări de la cîţiva profesori ai universităţii, am izbutit să obţin o sumă destul de mică de mărci germane şi m-am îmbarcat pe un vapor care călătorea de la Leningrad în Germania. Sosit la Gottingen, am închiriat o cameră tipică de student şi m-am pus pe lucru.

Aceasta se întîmpla exact la doi ani după descoperirea mecanicii ondulatorii (vezi capitolul IV) şi fiecare era preocupat să extindă teoriile iniţiale ale lui Bohr asupra structurii atomice şi moleculare în domeniul nou şi mai înaintat al mecanicii ondulatorii. Mie nu-mi place însă, şi niciodată nu mi-a plăcut, să lucrez în domenii aglomerate, în care lumea se înghesuie, şi m-am decis să văd dacă se poate face ceva în domeniul structurii nucleului atomic. Pe vremea aceea, nucleul se studia experimental, dar nu se încercase încă nici o teorie asupra structurii şi proprietăţilor sale. în aceste două luni de la Gottingen am dat peste o mină de aur şi am fost în stare să explic, pe baza mecanicii ondulatorii, fisiunea spontană a nucleelor radioactive ca şi dezintegrarea nucleului bombardat cu particule din afară. După cum am

aflat mai tîrziu, o lucrare foarte asemănătoare fusese făcută simultan de fizicianul englez R.W. Gurney, în colaborare cu fizicianul american E.U. Condon; într-adevăr, articolele noastre asupra acestei lucrări au fost prezentate spre publicare aproape în aceeaşi zi.

La închiderea Şcolii de vară de la Gottingen, banii mi se terminaseră şi urma să plec acasă. Pe drum însă, am hotărît să mă opresc la Copenhaga, pentru a-1 întîlni pe profesorul N. Bohr, a cărui operă o admiram atît. LaCopenhaga am luat cea mai ieftină cameră într-un mic hotel sărăcăcios şi m-am dus Ia Institutul lui Bohr, pentru a-i solicita secretarei Fr0ken Schultz (domnişoară) o întrevedere cu Bohr. (Cînd am vizitat Copenhaga, cu cîţiva ani în urmă, cu un an înaintea morţii lui Bohr, secretara continua să lucreze.) „Profesorul poate să vă primească astăzi după amiază[11], mi-a spus ea. Cînd am intrat în cabinetul lui de studiu, am fost întîmpinat de un om prietenos, zîmbitor, de vîrstă mijlocie, care m-a întrebat care sînt interesele mele în fizică şi la ce lucrez în momentul respectiv. I-am povestit despre lucrarea făcută la Gottingen asupra transformărilor nucleare, al cărei manuscris a fost trimis spre publicare, dar nu apăruse încă. Bohr a răsfoit lucrarea foarte atent şi a spus: „Foarte interesant, într-adevăr foarte, foarte interesant. Cît timp ai să mai ră- mîi aici?“ I-am explicat că mi-au mai rămas bani exact pentru o singură zi. „Ai putea să rămîi însă un an, m-a întrebat Bohr, dacă aş obţine pentru dumneata o bursă Carlsberg de la Academia noastră de Ştiinţe?"[§§§]. Mi s-a tăiat respiraţia şi, în fine, am reuşit să bolborosesc: „Da, desigur!" Pe urmă, lucrurile s-au desfăşurat repede. Freken Schultz mi-a găsit o cameră foarte drăguţă, într-o pensiune condusă de Fr0ken Have, la cîteva clădiri depărtare de Institut, care a devenit ulterior „o tabără" pentru mulţi tineri fizicieni veniţi să lucreze cu Bohr.Lucrul la Institut era foarte uşor şi simplu:

§§§ Al cărei membru am onoarea să fiu acuma.

fiecare putea să facă ce dorea, să vină la lucru şi să plece acasă cînd dorea. Un alt tînăr bursier, care a venit să locuiască la pensiunea lui Frgken Have, a fost Max Delbruck, din Germania. Amîndurora ne plăcea să dormim târziu dimineaţa şi Froken Have a elaborat o metodă specială pentru a ne trezi. Ea obişnuia să vină la camera mea şi să mă trezească: „Doctor Gamow, ar fi mai bine să vă sculaţi. Doctorul Delbruck tocmai şi-a terminat micul dejun şi a plecat la lucru!“ Pe urmă, dînsa proceda în acelaşi fel cu Delbruck, care mai dormea: „Doctor Delbruck, sculaţi-vă, doctorul Gamow tocmai a plecat la lucru!" Şi pe urmă, Max şi cu mine ne ciocneam la baie. Fiecare înainta însă cîte ceva în lucrul lui, mai ales către seară, care este timpul cel mai inspirat pentru fizicienii teoreticieni. Seara, lucrul în biblioteca Institutului era adesea întrerupt de către Bohr, care obişnuia să spună că e foarte obosit şi ar dori să meargă la cinema. Singurele filme care îi plăceau erau western-ele sălbatice (în stil Hollywood) şi el avea nevoie totdeauna de o pereche de studenţi ca să meargă cu el şi să-i explice complicatele comploturi care implicau indieni prieteni şi duşmani, bravi cowboy şi aventurieri, şerifi, bufetiere, căutători de aur şi alte tipuri din Old West. Dar mintea sa teoretică se vedea pînă şi în aceste expediţii la cinema. El a dezvoltat o teorie care explica de ce totdeauna cel rău este cel care trage primul, iar eroul pozitiv este mai rapid şi izbuteşte să-I ucidă. Această teorie a lui Bohr se baza pe psihologie. Deoarece eroul nu trage niciodată primul, cel rău trebuie să decidă cînd să tragă, ceea ce îi întîrzie acţiunea. Eroul, pe de altă parte, acţionează potrivit unui reflex condiţionat şi înhaţă puşca automat, de îndată ce vede mişcîndu-se mîna celui rău. Nu am fost de acord cu teoria sa şi, în ziua următoare, m-am dus la un magazin de jucării şi am cumpărat două puşti în gen western. Am jucat cu Bohr, el făcînd pe eroul, şi... şi-a „ucis“ toţi studenţii.

O altă remarcă a luiBohr, inspirată de filmele

western, se referă la teoria probabilităţii. El spunea: „Pot să cred că o fată singură poate să păşească pe o brînă îngustă în munţi, că poate greşi un pas şi, căzînd în prăpastie, să izbutească să apuce un brad subţire ce atîrnă de marginea prăpastiei şi să se salveze astfel de la o moarte inevitabilă. Pot de asemenea să-mi imaginez că exact în acelaşi timp se poate ca un frumos cowboy să călărească de-a lungul aceleiaşi brîne, şi observînd accidentul, să lege lasso-ul pe şeaua calului şi să coboare în prăpastie, să salveze fata. Mi se pare însă extrem de improbabil ca în acelaşi timp să fie prezent acolo un operator care să înregistreze acest moment palpitant pe peliculă !“ în tinereţea sa, Niels Bohr a fost aproape un atlet, iar în domeniul fotbalului (care se joacă în lumea veche cu o minge rotundă lovită cu piciorul)**** era al doilea, întrecut fiind numai de fratele său, binecunoscutul matematician Harald Bohr, care era cel mai bun portar al echipei din Copenhaga.

în timpul vacanţei de crăciun, în 1930, am plecat împreună cu Bohr (care era atunci în vîrstă de 45 de ani) să ne întîl- nim cu un grup de oameni de ştiinţă norvegieni (Rosseland, Solberg şi „Bătrînul“ Bjerknes) pentru a schia în partea nordică a Norvegiei, dincolo de cercul polar; Bohr a schiat cel mai bine dintre noi.

O întîmplare pe care sînt totdeauna gata să o povestesc sau să o scriu, întîmplare ce se referă la Bohr, este aceea cu privire la seara de la Copenhaga, cînd Bohr,Fru (D-na) Bohr, mai sus pomenitul Casimir şi cu mine ne întorceam de la masa de despărţire, dată de Oscar Klein, cu ocazia alegerii sale ca profesor universitar în Suedia natală. La acea oră tîrzie, străzile oraşului erau pustii (ceea ce nu s-ar putea spune astăzi despre străzile oraşului Copenhaga). In drum spre casă am trecut pe lingă clădirea unei bănci, ai cărei pereţi erau făcuţi din mari blocuri de beton. La colţul

****’ In Statele Unite fotbalul se joacă cu o minge ovală şi se loveşte şi cu mîna şi cu piciorul. — *N.T.*

clădirii, rosturile dintre blocuri erau suficient de adinei pentru a oferi un loc de proptire pentru un bun alpinist. Casimir, care era un cățărător experimentat, s-a cățărat pînă aproape de etajul al IlI-lea. Cînd Cas s-a coborît, Bohr, cu toate că era lipsit de experienţă, a pornit să repete isprava. In timp ce dînsul atîrna în mod precar la nivelul celui de al doilea etaj şi Fru Bohr, Casimir şi cu mine urmăream cu îngrijorare înaintarea sa, din spate s-au apropiat doi poliţişti cu mîinile pe tocul pistolului. Unul dintre ei, privind în sus, a spus celuilalt: „O, dar e profesorul Bohr!“ după care dînşii s-au îndepărtat liniştiţi în căutarea unor jefuitori de bancă mai periculoşi.

Există o altă anecdotă amuzantă care ilustrează şotiile lui Bohr. Pe uşa de intrare a vilei sale de la ţară, din Tisvil- de, dînsul a fixat o potcoavă de cal, despre care, cum este cunoscut, se crede că aduce noroc. Văzînd-o, un vizitator a exclamat: „Fiind un om de ştiinţă de talia d-voastră, credeţi oareîntr-adevăr că o potcoavă de cal pe uşa de intrare a casei aduce noroc?“ „Nu, răspunse Bohr, fără discuţie nu cred în această superstiţie. Dar ştiţi, adăugă dînsul cu un zîmbet, se spune că aduce noroc chiar dacă nu crezi în ea!“

După descoperirea mecanicii ondulatorii şi a formulării de către Heisenberg a principiului de nedeterminare, Bohr şi-a pus toată energia în scopul elaborării semifilozofice *apunc- tului de vedere dual* asupra microfenomenelor în fizică, conform căruia fiecare entitate fizică, fie ea o cuantă de lumină, un electron sau orice altă particulă atomică, se prezintă ca două feţe ale unei medalii. Pe de o parte ea poate fi tratată ca o particulă; pe de altă parte ea poate fi tratată ca o undă. Vom reveni cu o discuţie mai detaliată a acestei teme, în capitolul V. Prin urmare, Bohr, lucrînd cu asistentul său L. Rosenfeld, a extins relaţia de nedeterminare iniţială, de la o singură particulă, la cazul cîmpului electromagnetic, punînd în felul acesta bazele unei ramuri foarte complicate a teoriei cuantice,

cunoscută ca electrodinamica cuantică.

In anii de mai tîrziu, după descoperirea neutronilor, Bohr a început să se intereseze intens de teoria, pe atunci doar parţial dezvoltată, a reacţiilor nucleare. El a arătat că particula cu care se bombardează nucleul şi care intră in interiorul acestuia, nu azvîrle afară una din particulele din nucleu în acelaşi mod în care o bilă de biliard împinge alta,ci rămîne acolo pentru un interval scurt de timp (probabil cam o zecime de miliardime de secundă), distribuindu-şi energia de şoc *tuturor* celorlalte particule. Ulterior, această energie poate fi emisă sub forma unei cuante de raze gama sau, fiind colectată în unele dintre particulele nucleare, să le zvîrle pe acestea afară. Astfel, de exemplu, prima reacţie nucleară studiată de Rutherford nu trebuie să fie scrisă după cum se obişnuia

$$_7N^{14} + _2He^4 \text{ ----> } _8O^{17} + iH^1$$

ci mai degrabă ca un proces cu trei faze:

$$_7N^{14} + _2He^4 \text{ ----> } gF^{181\prime 1} \text{ - -> } _8O^{17} + jH^1$$

Cînd se scriu simbolurile nucleelor atomice ale diferitelor elemente chimice, indicele de jos din stînga este *numărul atomic* al elementelor; indicii superiori din dreapta sînt *greutăţile atomice* ale izotopilor consideraţi. Produsul intermediar de viaţă scurtă $_9F^{le[\ 1}$ (nucleul excitat al izotopului de fosfor) este cunoscut ca un „nucleu compus[11] şi introducerea acestei noţiuni simplifică în mod considerabil analiza reacţiilor nucleare complexe.

în anul 1933, cînd am plecat definitiv din Uniunea Sovietică, am devenit profesor de fizică la Universitatea George Washington, din Washington, unde în anul următor a venit şi un vechi prieten, fost student al lui Bohr, Doctorul Edward Teller. Urmînd linia de la Copenhaga, sub auspiciile Universităţii George Washington şi ale Institutului Carnegie din Washington, unde Dr. Merle Tuve lucra la nişte experienţe importante de fizică nucleară, se organizau Conferinţe anuale de fizică

teoretică. Conferinţa din 1939 a avut o participare deosebit de bună, Niels Bohr (care pe atunci vizita Statele Unite) şi Enrico Fermi (vezi capitolul VII) aflîndu-se în primul rînd în sală. Prima zi a conferinţei s-a desfăşurat liniştit , discutîndu-se probleme curente, dar în ziua a doua a izbucnit o mare agitaţie. în dimineaţa respectivă Bohr a venit ceva mai tîrziu, avînd în mînă o radiogramă de la Dr. Lise Meitner, din Stockholm (unde

Niels Bohr și Doamna Bohr pe motocicletă (fotografiat de autor)

G. Gamow ți W. Pauli pe un vapor pe un lac elvețian (fotograf necunoscut)

ea emigrase din Germania nazistă). Mesajul anunţa că fostul ei colaborator, profesorul Otto Hahn şi colaboratorii lui din Berlin au descoperit că bariul şi un alt element, care s-a dovedit a fi un izotop al criptonului, au apărut într-o mostră de uraniu bombardată cu neutroni. Dînsa şi nepotul ei, teoreticianul Otto Frisch, sugerau că experienţa a arătat că nucleul de uraniu, puternic lovit, se sparge în două părţi aproximativ egale.

Cititorul probabil că-şi imaginează agitaţia acestei zile şi a celorlalte zile ale conferinţei. In aceeaşi noapte, în laboratorul lui Tuve, experienţa a fost repetată şi s-a constatat că fisiunea uraniului provocată prin ciocnirea cu un singur neutron are loc cu emisia unuia sau a mai multor neutroni. Părea deschisă posibilitatea unei reacţii în lanţ şi a eliberării pe scară largă a energiei nucleare. După ce reporterii ziarelor au fost scoşi în mod politicos din camera de conferinţă, s-a trecut la cîntărirea foarte atentă a argumentelor pro şi contra reacţiei de fisiune în lanţ. Bohr şi cu Fermi, armaţi cu nişte crete mari şi stînd în faţa tablei, păreau doi cavaleri la o întrecere medievală. în felul acesta a intrat energia nucleară în lumea omului, conducînd la bombele de fisiune cu uraniu, la reactorii nucleari şi mai tîrziu la armele termonucleare!

Cînd a început cel de al doilea război mondial, Bohr se afla la Copenhaga şi el a hotărît „să-l treacă[11] sub ocupaţia nazistă pentru a-şi ajuta pe cît posibil mai mult compatrio- ţii. Intr-o zi el a fost însă informat de un funcţionar danez că urmează să fie arestat de către Gestapo în dimineaţa uflhătoare. In aceeaşi noapte, un pescar danez l-a transportat peste Sund, spre ţărmul suedez, unde a fost luat de un bombardier britanic de tip Mosquito. Bombardierele Mosquit o erau mici şi singurul loc pentru Bohr era scaunul liber din coada avionului, ocupat în mod obişnuit de trăgătorul din spate. El putea să comunice cu cel din carlingă numai prin interfon. Undeva, deasupra

Mării Nordului, pilotul a vrut să-l întrebe pe Bohr cum se simte, dar nu a putut obţine nici un răspuns. Serios alarmat, pilotul de îndată ce a aterizat pe pământul englez a alergat la partea posterioară a avionului şi a deschis uşa compartimentului trăgătorului din coadă. Bohr era perfect sănătos şi dormea adînc!

Venind din Anglia în Statele Unite, Bohr s-a dus de-a dreptul la Los Alamos, pentru a colabora la lucrările privitoare la bomba cu fisiune. Datorită regulilor stricte de securitate, el poseda documente pe numele de Nicholas Baker şi era cunoscut sub numele intim de Unchiul Nick. Se povesteşte că în timpul uneia din vizitele sale la Washington, el s-a întîlnit în ascensorul hotelului cu o tînără femeie, pe care o văzuse adesea la Copenhaga. Ca soţie a unui fizician nuclearist, Dr.von Halban,dînsa vizita adesea Copenhaga împreună cu soţul ei. „Foarte bucuroasă să vă revăd, profesore Bohr“, îl întîmpină dînsa. „Regret, spuse Bohr, dar vă înşelaţi, mă numesc Nicholas Baker. Dar, adăugă dînsul, încercînd să fie politicos şi fără a încălca regulile de securitate, mi-amintesc de d-voastră, sînteţi d-na von Halban“. „Nu, i-o reteză ea, sînt d-na Placzek“. Poanta este că dînsa, cu puţin timp înainte, divorţase de primul soţ şi se căsătorise cu George Placzek, care cu ani înainte a lucrat un timp considerabil cu Bohr.

în vara anului 1960, pe cînd călătoream cu soţia în Europa, am mers la Copenhaga pentru a-1 vizita pe Bohr şi familia sa. El îşi petrecea vara in vila sa de la ţară, în Tisvilde, şi ne-a invitat să fim musafirii lui pentru cîteva zile. L-am regăsit acelaşi, cum îl cunoşteam, cum l-am văzut prima oară în 1928, dar, desigur mult mai lent în mişcări şi mai puţin energic. Am purtat multe discuţii interesante cu privire la dificultăţile din stadiul prezent de dezvoltare a fizicii. A fost prin urmare un şoc, atunci cînd, vreo doi ani mai tîrziu, am auzit la radio că Niels Bohr a murit.

W. PAULI SI PRINCIPIUL DE EXCLUDERE

Unul din cei mai pitoreşti vizitatori de la Blegdamsvej era fără îndoială Wolfgang Pauli. Născut în Germania, în anul 1900, el şi-a petrecut o mare parte din viaţă ca profesor la Ziirich, dar apărea pe neaşteptate ca un „drac al inspiraţiei", oriunde era dezvoltată fizica teoretică. Rîsul lui răsunător, puţin sardonic, însufleţea orice conferinţă la care apărea, oricît de insipidă era aceasta la început. El venea întotdeauna cu idei noi, povestind auditoriului despre acestea, în timp ce se plimba încontinuu în spre şi de la tablă, legănîndu-şi încet trupul corpolent. Manierele lui au inspirat pe cineva să scrie un poem din care pot să-mi amintesc doar fragmentul următor:

> Cu colegii cînd discută, Cu tot trupul oscilează; Tezele cînd le dispută, Oscilaţia-i nu-ncetează. Iar ideile-i trăsnite Par a fi din deget supte.

Odată, probabil la indicaţia unui medic, Pauli a hotărît să scadă în greutate şi, ca în tot ceea ce făcea, a reuşit foarte iute. Cînd a reapărut la Copenhaga, cu un număr

de kilograme lipsă, era un om complet deosebit: grav, lipsit de umor şi mormăind în loc să rîdă. Noi toţi l-am presat să se alăture nouă la delicioasele şniţele vieneze şi la buna bere Carlsberg şi, în mai puţin de două săptămîni, Pauli a redevenit vechiul, veselul Pauli.

Din punct de vedere politic, Pauli era antinazist şi nu şi-a ridicat niciodată mina dreaptă pentru salutul „Heil Hitler“, cu o singură excepţie. Ţinînd un curs la Universitatea din Michigan, în Ann Arbor, el a luat parte la o veselă partidă de canotaj pe lac şi, păşind afară din vas pe întuneric, a căzut jos şi şi-a fracturat din umăr braţul drept. Braţul a fost pus în ghips, cu un suport care-1 ţinea ridicat la 45°. Cînd a apărut la primul său curs, el ţinea creta în mîna stingă şi se adresa studenţilor în maniera specific nazistă. El a refuzat însă să se lase fotografiat, pînă nu i s-a scos ghipsul.

Pauli şi-a început cariera ştiinţifică foarte de tînăr şi la vîrsta de 21 de ani a scris o carte asupra teoriei relativităţii, care continuă (în ediţia revăzută) să fie una din cele mai bune cărţi asupra acestui subiect. El este vestit în fizică pentru trei lucruri:

1.*Principiul lui Pauli,* pe care el prefera să-l numească principiul de excludere.

2.*Neutrino-ul lui Pauli,* pe care l-a conceput la începutul deceniului al 3-lea şi care timp de trei decenii n-a putut fi detectat experimental.

3.*Efectul Pauli,* un fenomen misterios, care nu a fost şi probabil nu va putea fi niciodată înţeles pe o bază pur materialistă.

Este binecunoscut că fizicienii teoreticieni nu pot mînui instalaţiile experimentale; ele se defectează de îndată ce aceştia le ating. Pauli era un atît de bun fizician teoretician încît, în mod curent, în laboratorul în care el doar trecea pragul, se defecta ceva. Odată s-a întîmplat un eveniment misterios, care la prima privire nu părea să fie conectat cu prezenţa lui Pauli, eveniment care a avut loc în laboratorul din Gottingen, al profesorului J. Franck.

într-o după amiază de vreme, fără nici o cauză aparentă, un aparat complicat pentru studiul fenomenului atomic s-a defectat. Franck i-a scris într-un ton plin de humor despre această întîmplare lui Pauli, pe adresa din Ziirich; după un oarecare timp a primit răspunsul într-un plic cu o ştampilă daneză. Pauli scria că se află în vizită la Bohr şi că în timpul defecţiunii din laboratorul lui Franck, trenul cu care călătorea se oprise pentru cîteva minute în gara din Gottingen. Puteţi să credeţi sau nu această anecdotă, să ştiţi însă că sînt multe alte observaţii privitoare la realitatea efectului Pauli I

COTE PENTRU NIVELELE ELECTRONILOR

Principiul lui Pauli, spre deosebire de efectul Pauli, este mult mai bine stabilit şi se referă la mişcarea electronilor în atomi. în capitolele anterioare, am descris orbitele cuantice sau, într-un limbaj mai modern, stările de oscilaţie, cuantice, în cîmpul coulombian de forţe care înconjură nucleul atomic††††. Deoarece atomul de hidrogen posedă un singur electron, acest electron este liber să ocupe oricare din stările de energie posibile şi, în absenţa unei excitaţii exterioare, se aşează în mod natural pe starea de cea mai joasă energie, cît mai aproape de nucleu. Dacă este ridicat de către o forţă externă pe o oarecare stare de energie mai înaltă, el recade înapoi în starea iniţială cea mai joasă, emiţând diferitele linii ale spectrului hidrogenului. Ce se întîmplă însă în atomii care posedă 2, 3 sau mai mulţi electroni? în capitolul II am dedus două formule pentru atomul de hidrogen aflat în starea de energie minimă *(n* = 1). Raza orbitei sau, mai exact, raza medie a funcţiei continue care descrie starea acestuia este dată de

$$r_i = \frac{k^2}{4n^a e^2 w}$$

††††Vezi capitolul următor.

şi energia minimă de

$$E'$$

Aceste formule sînt obţinute în presupunerea că forţa electrică este egală cu e^2/r^2.

Să presupunem acuma că un singur electron se roteşte în jurul unui nucleu cu sarcina Ze, unde Z este numărul atomic al acestuia. In cazul acesta, forţa va fi $Ze^{‡‡‡}$ §§§§$/r^2$ în loc de e^2/r^2 şi în formulele de mai sus va trebui să înlocuim pe e^2 cu Ze^2 şi pe e^{*****} cu Z^2e^4. O dată cu creşterea numărului atomic Z, razele stării fundamentale vor scădea proporţional cu Z, iar valorile absolute ale energiilor acestora vor creşte proporţional cu Z^2. Dacă în loc de un singur electron vom introduce cei Z electroni şi dacă ei toţi s-ar îngrămădi pe nivelul cel mai de jos, atomii care formează sistemul natural al elementelor ar deveni din ce în ce mai mici, şi din ce în ce mai strîns legaţi. Desigur, argumentînd în felul acesta, va trebui să ţinem seama că respingerea electrostatică dintre electroni va tinde să-i despartă, dar se poate arăta uşor că această respingere nu este suficient de puternică pentru a împiedica elementele grele să se strîngă în dimensiuni considerabil mai mici. Rezultă că volumele[2] atomilor ar trebui să descrească continuu şi destul de repede, pornind de la hidrogen la uraniu, aşa cum indică linia întreruptă din fig. 15 *a.* Linia continuă din aceeaşi figură, care reprezintă datele experimentale, nu seamănă de loc cu cealaltă. Ea arată doar o pantă foarte lentă şi este caracterizată în principal prin forma sa dinţată cu vîrfuri foarte ascuţite în poziţiile corespunzătoare gazelor nobile (He, Ne, A, Kr, Xe etc.) care, aşa cum cunoaşte orice chimist, sînt inerte şi formează foarte greu

---

‡‡‡Acestea pot fi calculate din greutăţile atomice cunoscute şi din
§§§§densităţile diferitelor elemente, divizînd greutatea unui cm^8 dintr-un
*****element dat, prin greutatea atomilor acestuia.

compuşi cu alte elemente sau între ele. De asemenea, dacă toţi electronii dintr-un atom s-ar acumula pe nivelul de energie minim, dificultatea extragerii unui electron din atom ar creşte repede de la elementele uşoare la cele grele de-a lungul sistemului natural (linia punctată din fig. 15 *b).* Nici aceasta nu seamănă de loc cu curba observată a potenţialelor de ionizare care caracterizează dificultatea extragerii şi care este reprezentată în aceeaşi figură printr-o linie continuă. In plus, comparînd aceste două curbe, vom observa că dificultatea maximă de extragere a unui electron atomic are loc în aceleaşi locuri în care volumele atomice au valorile cele mai mici. Astfel, lucrurile apar ca şi cum secvenţa elementelor chimice poate

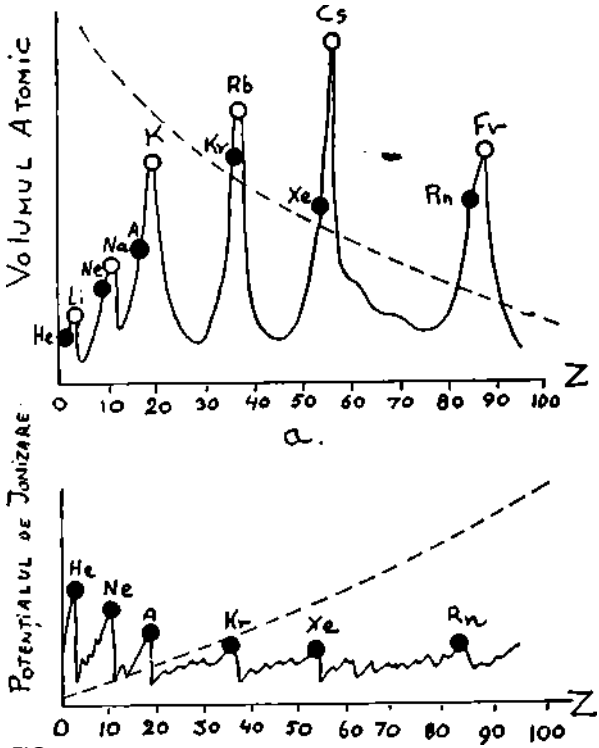


FIG. **15.**
Variaţia volumelor atomice şi a potenţialelor de ionizare de-a lungul sistemului natural al elementelor. Cercurile negre corespund gazelor nobile, care, avînd învelişuri saturate, au legăturile cele mai puternice. Cercurile albe sînt metalele alcaline care încep să formeze învelişuri noi.

fi reprezentată printr-un şir de corpuri cu dimensiuni care variază periodic şi cu rezistenţă opusă eliberării electronilor proprii, de asemenea periodică. Rezultă concluzia că prin adăugarea unui număr din ce în ce mai mare de electroni, volumele ocupate de diferitele stări cuantice se concentrează, dar numărul stărilor ocupate de electroni creşte, astfel că diametrul total exterior al atomului rămîne aproximativ constant. Prin urmare, trebuie să existe un principiu fizic fundamental potrivit căruia

electronii atomici sînt împiedicaţi de a se îngrămădi pe starea cuantică minimă; de îndată ce „cota“ pentru un nivel dat este umplută, electronii suplimentari trebuie să se aranjeze pe alte stări cuantice, de energie mai înaltă. Pauli a sugerat că lucrurile pot fi puse în ordine în mod satisfăcător dacă se admite *ca numai doi electroni* să poată ocupa orice stare cuantică dată, descrisă prin trei numere cuantice: radial n_T, azimutal n®, şi orientaţional[†††††] n_0. în teoria iniţială a lui Bohr, în cadrul căreia a fost formulat pentru prima oară principiul lui Pauli, aceste trei numere cuantice corespundeau la diametrele medii, excentricităţile şi orientările spaţiale ale orbitelor cuantice ale electronilor. In mecanica ondulatorie[‡‡‡‡] ei reprezintă numărul nodurilor în mişcarea oscilatorie tridimensională complicată a funcţiilor T.

Folosind principiul lui Pauli, Bohr şi colaboratorii lui (incluzînd bineînţeles pe Pauli însuşi) au fost în stare să construiască modelele tuturor atomilor, de la hidrogen la uraniu. Ei au reuşit nu numai să explice modificarea periodică a volumelor atomice şi a potenţialelor de ionizare, ci să explice şi toate celelalte proprietăţi ale atomilor, afinităţile lor chimice reciproce, valenţele lor şi alte proprietăţi pe care, cu mulţi ani înainte, le-a însumat şi le-a sistematizat pe o bază pur empirică chimistul rus D.I. Mendeleev, în cadrul sistemului periodic al elementelor, care-i poartă numele. Toate aceste dezvoltări se află în afara scopului acestei mici cărţi, a cărei ţintă principală o constituie descrierea ideilor noi, revoluţionare, şi nu atît a consecinţelor

---

††††† Pentru o mai mare simplitate, ne-am îndepărtat aici de la notaţiile curente ale numerelor cuantice. în orice ramură ştiinţifică terminologia devine aşa de împovărătoare în procesul progresului, încît este extrem de dificil s-o reprezinţi într-un mod simplu pentru un cititor care întîlneşte toate aceste noţiuni complicate pentru prima oară.

‡‡‡‡ Vezi capitolul următor.

lor detaliate.

ELECTRONUL CU SPIN

Studiile şi interpretările spectrelor atomice, pe baza teoriei lui Bohr care se folosea de trei numere cuantice (absolut natural pentru spaţiul tridimensional!) pentru a descrie mişcarea electronilor atomici, s-au dezvoltat cu succes pînă cînd, la începutul deceniului al treilea, s-a dovedit brusc că trei numere cuantice nu mai erau suficiente. Studiile efectului Zeeman (scindarea liniilor spectrale datorită cîmpurilor magnetice puternice) puneau în evidenţă că există mai multe componente spectrale decît cîte puteau fi explicate cu ajutorul a trei numere întregi; pentru a explica existenţa acestora, a fost introdus un al patrulea număr cuantic. Iniţial a fost denumit „numărul cuantic intern[11], un nume tot aşa de bun ca şi oricare altul, fiindcă nimeni nu putea să explice multipleţii suplimentari. In 1925 însă doi fizicieni olandezi, Samuel Goudsmit şi George Uhlenbeck, au făcut o propunere îndrăzneaţă. Această scindare suplimentară a liniilor, sugerau ei, nu se datorează vreunui număr cuantic suplimentar care descrie orbita electronului în atom, ci electronului însuşi. încă de la descoperirea sa, electronul fusese considerat ca un punct caracterizat doar prin masa şi prin sarcina sa electrică. Nu l-am putea oare însă considera ca pe un mic corp încărcat electric care se roteşte în jurul axei sale ca un titirez? In felul acesta el ar avea un oarecare moment unghiular şi un moment magnetic precum are fiecare sarcină care se roteşte. O orientare diferită a spinului electronului (cum a fost denumit) faţă de planul orbitei sale ar explica atunci componentele adiţionale, multipleţii suplimentari.

S-a descoperit curînd că propunerea făcută corespunde şi că atribuind electronului o valoare numerică corespunzătoare pentru spin (adică un moment mecanic unghiular) şi un moment magnetic se pot explica toate componentele suplimentare ale

liniilor găsite de către experimentatori. Momentul magnetic al electronului cu spin a avut amabilitatea de a fi egal cu aşa-numitul *magnelon al lui Bohr.,* adică cantitatea minimă de magnetism care putea fi cauzată prin rotirea sa în jurul nucleului. încurcături au apărut însă în ce priveşte momentul unghiular mecanic al electronului cu spin, care a reieşit că este doar *jumătate* din momentul unghiular obişnuit *h/în* al orbitelor atomice.

S-au făcut multe încercări de depăşire a acestei dificultăţi şi problema a fost în cele din urmă rezolvată de P.A.M. Dirac — cu patru ani mai tîrziu — pe o cale cu totul neconvenţională (vezi capitolul VI). Motivul pentru care introducerea electronului cu spin modifica principiul lui Pauli al mişcării electronului atomic poate fi înţeles în modul următor. După cum vă aduceţi aminte, acest principiu postula că *numai doi* electroni pot ocupa orice orbită cuantică dată. De ce doi? După descoperirea electronului cu spin, principiul iniţial al lui Pauli a fost completat cu afirmaţia: *„numai doi care posedă spin opus“*, adică cei care se rotesc în sens opus.

Situaţia este ilustrată grafic în fig. 16. Desenul *a* reprezintă tabloul vechi, în care doi electroni punctiformi, şi e_2, se mişcă de-a lungul aceleiaşi orbite. In desenul *b* avem reprezentarea mai recentă, anume că doi electroni se pot mişca de-a lungul aceleiaşi orbite numai dacă unul din ei, e_n se roteşte în jurul axei sale în acelaşi sens în care se roteşte în jurul nucleului, în timp ce al doilea, e_2, se roteşte în direcţie opusă. Putem adăuga că desenul *b* nu este riguros corect, deoarece interacţiunea dintre momentul magnetic al unui electron şi cîmpul magnetic din interiorul atomului, în care se mişcă, modifică uşor orbita, astfel că avem de fapt două orbite, desenul c, fiecare avînd un singur electron. Astfel, principiul iniţial al lui Pauli poate fi reformulat în sensul că *permite ca pe fiecare orbită,* atunci cînd se ia în considerare uşoara scindare a

orbitei iniţiale, să *existe un singur electron.*

PAULI ŞI FIZICA NUCLEARĂ

Trecem acuma la un cîmp complet diferit al activităţii lui Pauli în ştiinţă, la contribuţia sa în domeniul fizicii nucleare. După cum fiecare cunoaşte — sau măcar ar trebui să cunoască — elementele radioactive emit trei feluri de radiaţii: alfa (a), beta (Ş) şi gama (y). Procesul principal al dezintegrării radioactive îl constituie emisia de particule alfa fragmente mari de nuclee instabile, care s-au dovedit a fi, după cum a arătat Rutherford, nuclee de atomi de heliu. Pe

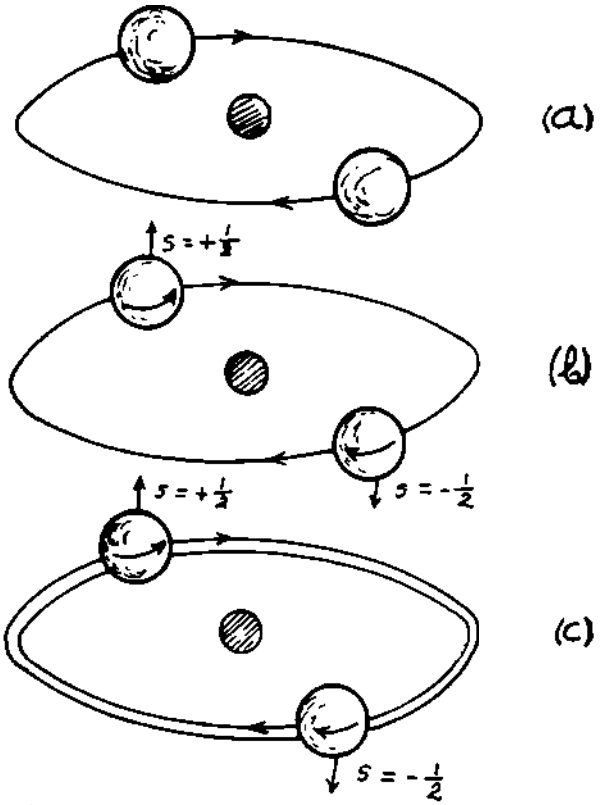


FIG. 16.
Mişcarea a doi electroni de-a lungul aceleiaşi orbite potrivit (a) *princpiului iniţial al lui Pauli (una şi aceeaşi orbită nu poate fi ocupată de mai mult de doi electroni); şi* (b) *principiul lui Pauli corectat (doi electroni care ocupă aceeaşi orbită trebuie să aibă spin opus, adică să se rotească în jurul axei proprii în direcţii opuse)*; şi *potrivit* (c) *principiului lui Pauli reformulat în care, datorită forţelor magnetice care apar de la momentele magnetice ale electronilor, orbitele nu sînt identice şi pe fiecare nivel de energie este permis un singur electron.*

de altă parte, particulele p sînt constituite din electroni care sînt uneori emişi de nuclee, ca urmare a unei dezintegrări a pentru a restabili balanţa dintre sarcină şi masă care a fost tulburată de emisia unei particule a. In sfirşit, razele y sînt constituite din unde electromagnetice scurte, care

rezultă din perturbările interne provocate de emisiile a şi (3. Pentru un element radioactiv dat, particulele a posedă exact aceeaşi energie, corespunzătoare la diferenţele de energie dintre nucleele mamă şi fiică. Razele y posedă linii complexe foarte nete, mult mai nete, în fapt, decît liniile spectre- lor optice.

Toate aceste manifestări indică faptul că nucleele atomice sînt sisteme cuantificate similare cu atomii, cu deosebirea că au dimensiuni mai mici; deoarece dimensiunile lor sînt mai mici, transformările care le suferă, potrivit legilor cuantice, implică energii mult mai mari. A fost însă o teribilă surpriză pentru fizicieni descoperirea făcută de James Chadwick, în 1914, care a arătat că, spre deosebire de particulele a şi de razele y emise de nucleele radioactive, particulele [3 nu posedă energii bine determinate. Ba, dimpotrivă, spectrul lor energetic se întinde în mod continuu, practic de la zero pînă la valori foarte mari (fig. 17). Posibilitatea ca această împrăştiere a energiilor să se datoreze unor oarecari pierderi interne, suferite de particulele [3 în procesul de eliberare din materialul radioactiv, a fost în mod definitiv respinsă datorită unor experienţe foarte îngrijite. Şi astfel, fizicienii s-au găsit în faţa unei situaţii în care conturile de energie intrată şi cheltuită nu se compensau. Niels Bohr, care a fost primul care s-a ciocnit cu aceste date experimentale, s-a situat pe punctul de vedere radical, potrivit căruia, dacă experienţele indică aceasta, atunci într-adevăr legea conservării energiei nu este respectată în cazul emisiei [3 şi (probabil) în cazul proceselor de absorbţie (3. Într-adevăr, epoca respectivă era epoca în care, sub presiunea teoriilor noi, a relativităţii şi a cuantelor, atît de multe legi ale fizicii clasice au fost înlăturate, încît nici una din legile fizicii clasice nu părea a fi de neclintit. Bohr a încercat chiar să utilizeze această aşa pretinsă neconservare a energiei în procesele de emisie [3 pentru a explica aparenta producere eternă de energie în stele.

Conform cu acest punct de vedere, puţin cunoscut şi niciodată publicat, stelele ar conţine în interiorul lor miezuri mari de materii nucleare, avînd aceleaşi proprietăţi ca şi nucleele atomice obişnuite, dar avînd dimensiuni cu mult mai mari (mai degrabă de ordi-

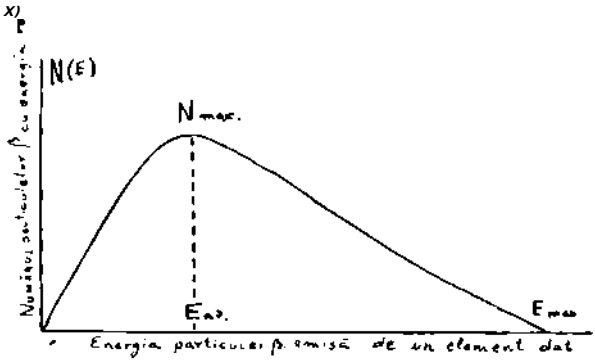


FIG. 17.
Curbă tipică de distribuţie a energiei unuPemiţător Ş tipic.

nul kilometrilor, decît de ordinul a IO"§§§§§ cm). Aceste miezuri ale stelelor, presupuse a fi instabile, ar emite particule p de energie bine determinată. Ele ar fi înconjurate de materie obişnuită, într-o stare de ionizare completă (de plasmă, cum am spune astăzi) constînd din electroni liberi de mare energie şi din nuclee simple, despuiate. Energia electronilor care formează baza acestor învelişuri stelare era determinată cu ajutorul relaţiei clasice

$$E = \underset{o}{-} kT$$

§§§§§'Conform cu teoria mecanică a căldurii, dezvoltată la mijlocul secolului trecut de Boltzmann şi Maxwell, „căldura nu este nimic altceva decît mişcarea moleculelor din care este format materialul corpurilor". Ei au găsit că energia mişcării termice (raportată la moleculă) este proporţională cu temperatura absolută a acesteia — adică cu temperatura măsurată la „zero absolut", de —273°C. Coeficientul de proporţionalitate, determinat pe cale empirică (sa , mai exact, 2/3 din acesta), a fost denumit constanta lui Boltzmann.

unde *k* este constanta lui Boltzmann, iar *T* temperatura laba- za învelişului[5]. Pe de altă parte, particulele p emise de la suprafaţa practic plană a miezului nuclear au totdeauna *aceeaşi energie,* determinată de proprietăţile interne ale fluidului nuclear. Aşa că trebuie să existe un echilibru dinamic între miezul nuclear şi învelişul gazos ionizat (plasmă) similar cu echilibrul dintre apă şi vaporii saturaţi de la suprafaţa acesteia. Numărul particulelor (3 emise de miezul radioactiv era egal cu numărul electronilor liberi, absorbiţi de acesta din înveliş. Dar, în timp ce energia electronilor liber absorbiţi din anvelopă este determinată de temperatura acesteia, T, energia particulelor (3 emise de către miez este totdeauna aceeaşi, corespunzătoare unei anumite temperaturi nucleare universale, T_o. Prin urmare, pentru $T < T_o$ are loc un flux constant de energie din miezul nuclear în anvelopă şi acest flux pătrunzînd pînă la suprafaţa stelei, menţine temperatura ridicată a acesteia. În virtutea neconservării energiei în procesele de emisie (3 în miezul nuclear nu se schimbă nimic şi stelele ar putea să radieze etern. Bohr vorbea despre această teorie a sa într-o manieră uşor critică, dar apărea ca şi cum el nu ar fi fost prea surprins dacă aceasta s-ar fi dovedit adevărată.

NEUTRI NO-UL

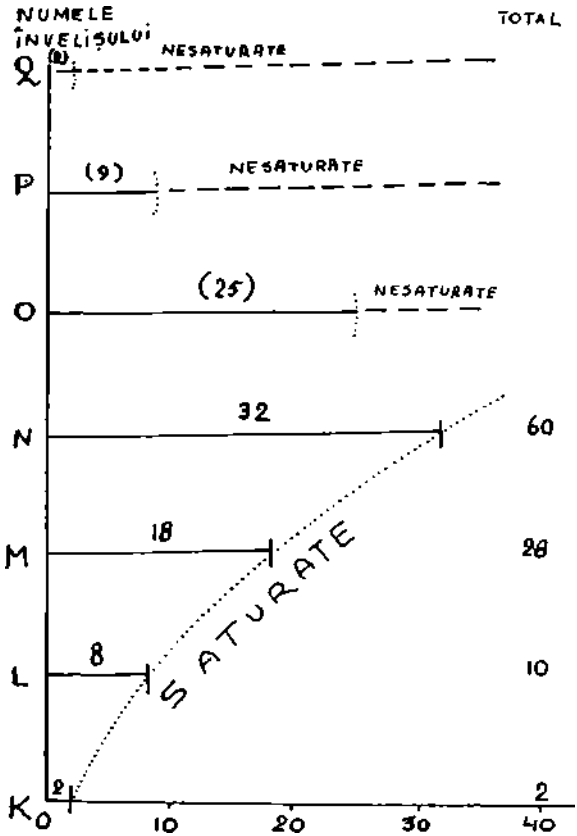
Pauli, care nu putea fi acuzat de conservatism, indiferent în ce sens, era, totuşi, de cu totul altă părere decît Bohr. El prefera să presupună că balanţa energiei, violată datorită continuităţii spectrului razelor [3, era restabilită datorită emisiei unor particule de altă natură, deşi necunoscute, pe care el le denumea „neutroni[11]. Numele acestui „neutron al lui Pauli[11] a fost ulterior schimbat în „neutrino[11], după descoperirea lui Chadwick a ceea ce astăzi este denumit neutron. Despre neutrini s-a presupus a fi particule care nu poartă sarcină

electrică şi care nu posedă masă (sau cel puţin nu o masă despre care să se poată vorbi). Despre aceştia s-a presupus că sînt emişi în perechi cu particulele (3, de o asemenea manieră încît suma energiilor lor şi ale particulelor [3 este întotdeauna aceeaşi, fapt care fără discuţie ar restabili buna, vechea lege a conservării energiei. Dar, datorită lipsei de sarcină şi masei lor nule, ele sînt practic nedetectabile, strecurîndu-se printre degetele celor mai abili experimentatori. în afara lui Bohr, un alt neutrinofob a fost P. Ehrenfest şi, pe această temă, între aceştia trei a avut loc o imensă şi aprinsă discuţie verbală şi a fost purtată o corespondenţă voluminoasă, niciodată publicată.

Pe măsura trecerii anilor, se adunau din ce în ce mai multe dovezi în favoarea neutrinilor lui Pauli, cu toate că dovezile erau indirecte. De-abia în anul 1955, doi fizicieni de la Los Alamos, F. Reines şi C. Cowan au stabilit, în afara oricărei posibilităţi de îndoială, existenţa neutrinilor, capturîndu-i în timp ce aceştia erau emişi din pilele atomice ale proiectului Savannah River al Comisiei pentru Energia Atomică. Ei au stabilit că interacţiunea dintre neutrini şi materie este atît de slabă încît, pentru a reduce intensitatea unui fascicul de neutrini la jumătate, ar trebui un ecran de fier de grosimea a citorva ani-lumină. în prezent, neutrinii ocupă un loc din ce în ce mai mare în studiile referitoare la particulele elementare şi la fenomenele astrofizice; s-ar putea ca ei să devină cea mai importantă particulă elementară din fizică. S-a stabilit că neutrinii ca şi electronii se comportă ca nişte mici sfîrleze, avînd spini, iar momentele lor cinetice sînt egale cu ale electronilor. Dar, deoarece neutrinii nu posedă sarcină electrică, momentul lor magnetic este egal cu zero.

Ulterior, s-a stabilit experimental că protonii şi neutronii posedă acelaşi spin ca şi electronii şi se supun priri- cipiului lui Pauli. Ultimul fapt are o importanţă foarte mare în problema structurii interne a nucleelor atomice, nuclee care sînt

formate prin aglomerarea unui număr variat de protoni şi neutroni, strînşi puternic împreună datorită forţelor nucleare. Aşa cum a arătat pentru prima oară, în 1934, G. Gamow secvenţa naturală a nucleelor atomice de la hidrogen la izotopii uraniului prezintă variaţii periodice ale diferitelor proprietăţi ale acestora, variaţii similare cu variaţiile proprietăţilor chimice ale atomilor din cadrul sistemului periodic al elementelor, al lui Mendeleev, dar mult mai puţin accentuate. Această periodicitate indică faptul că nucleele atomice trebuie să posede o structură de tipul păturii, similară cu aceea a structurii învelişurilor electronice ale atomilor, dar probabil mult mai complicată. Situaţia este complicată în cazul de faţă de faptul că în timp ce învelişurile atomice sînt formate dintr-un singur tip de particule, anume din electroni, nucleele sînt formate din două tipuri de particule, neutroni şi protoni, şi de faptul că principiul de excludere al lui Pauli se aplică

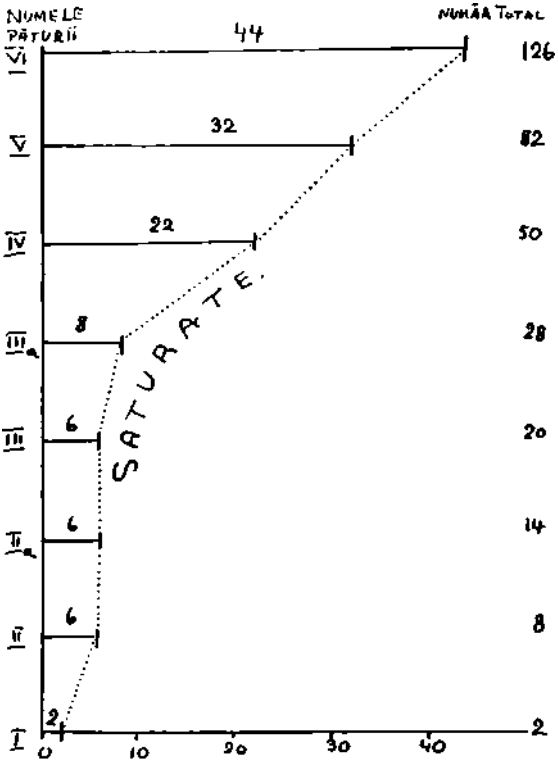


(GJ) **A/u<wxăruL** *ov|,i* **lor uw Î-H.U®linurile ^Tow/c»** *Sectu* **ra-te**

F:G. *18.*

O comparaţie între (a) *saturaţia învelişurilor electronice în diagrama Bohr-Coster a secvenţei atomilor şi* (b) *dia- g'cma lui Mayer-Jensen a saturaţiei păturilor protonilor şi neutronilor în secvenţa nucleelor atomice.*

fiecărui tip în parte, separat. Astfel, orice stare dată de energie, caracterizată prin trei numere cuantice, poate să accepte doi protoni (cu spin opus) împreună cu doi neu-



(6) Numărul protonilor sau al neutronilor în păturile nucleare saturate

troni (de asemenea cu spin opus) şi avem de fapt două sisteme de pături unul pentru protoni şi unul pentru neutroni, care se suprapun unele peste altele. Există încă şi o altă dificultate. Datorită împachetării strînse a protonilor şi neutronilor în nucleu, calculul nivelelor energetice devine considerabil mai complicat. Problema a fost în cele din urmă rezolvată în 1949 de M. Goeppert Mayer şi H. Jen- sen şi alţii, care au putut să demonstreze că păturile de neutroni, ca şi cele de protoni din interiorul nucleelor au fiecare capacităţi de 2, 8, 14, 20, 28, 50, 82 şi 126 particule fiecare, aşa cum se arată schematic în fig. 18. Aceste nu-

 mere cunoscute sub numele de „numere magice" au permis fizicienilor să înţeleagă în mod complet periodicitatea observată în structura nucleelor.

O altă aplicaţie importantă a principiului lui Pauli poate fi găsită în lucrarea lui P.A.N. Dirac, care a utilizat acest principiu pentru a explica stabilitatea materiei, ceea ce se va arăta în capitolul VI. Pe baza acestei teorii, Dirac a ajuns la concluzia că fiecărei „particule normale", ca de exemplu electronului, protonului, neutronului şi fiecăreia din hoarda de particule descoperite în ultimul deceniu, trebuie să-i corespundă o „antiparticulă", avind exact aceleaşi proprietăţi fizice, dar sarcină electrică opusă. Despre acestea se va discuta mai în amănunt în capitolele VI si VIII.

Pentru a încheia acest capitol, este suficient să spunem că este tot atît de dificil să fie găsită o ramură a fizicii moderne în care să nu se utilizeze principiul lui Pauli, pe cît este de greu să se găsească un om tot atît de înzestrat , simpatic şi amuzant, pe cît a fost Wolfgang Pauli.

L. DE BROGLIE
SI UNDELE
PILOT

Louis Victor, duce de Broglie, născut la Dieppe în 1892, şi care a devenit prinţ de Broglie în urma morţii unui frate mai mare, a avut o carieră ştiinţifică neobişnuită. Ca student la Sorbona, el a hotărît să-şi închine viaţa studiului istoriei evului mediu, dar izbucnirea primului război mondial l-a determinat să intre în rîndurile armatei franceze. Fiind un om cu formaţie intelectuală, el a fost utilizat în- tr-una din unităţile de radiocomunicaţie, care la timpul respectiv constituia o noutate, fapt care i-a schimbat interesul de la catedralele gotice la undele electromagnetice. In 1925'el a prezentat o teză de doctorat care conţinea idei atît de revoluţionare referitoare la o modificare a teoriei iniţiale a lui Bohr asupra structurii atomice, încît cei mai mulţi fizicieni o priveau cu mult scepticism; într-adevăr, teoria lui de Broglie a fost denumită ironic „la Comedie Franşaise“.

Datorită faptului că a lucrat cu undele radio în timpul războiului şi fiind totodată un cunoscător al muzicii de cameră, de Broglie a hotărît să privească atomul ca pe un fel de instrument muzical care, potrivit cu construcţia sa, poate să emită un anumit ton fundamental şi o secvenţă de armonice. Deoarece, la timpul respectiv era foarte bine

stabilit că orbitele electronice ale lui Bohr caracterizează diferitele stări cuantice ale unui atom, el le-a ales pe acestea ca structură de bază pentru schema sa ondulatorie. A presupus că fiecare electron, mişcîndu-se pe o orbită dată, este acompaniat de o undă pilot misterioasă (cunoscută astăzi ca undă de Broglie), undă care se întinde de-a lungul întregii orbite. Prima orbită cuantică poartă o singură undă, a doua două unde, a treia trei ş.a.m.d. Astfel, lungimea de undă a primei unde trebuie să fie egală cu lungimea $2\hat{i}tr_1$ a primei orbite cuantice, lungimea celei de a doua unde trebuie să fie egală cu jumătate din lungimea celei de **a** doua orbite, -^27rr_2, etc. In general, a n-a orbită cuantică poartă *n* unde fiecare, cu lungimea y 2rcr_n fiecare.

După cum am văzut în capitolul II, raza celei de **a n-a** orbite a atomului lui Bohr este

$$\frac{fe^2}{me^2}$$

Din egaliiatea dintre forţa centrifugă datorită mişcării orbitale şi atracţia electrostatică dintre particule încărcate, obţinem:

$$\frac{2}{mv_n\ fi-}$$

şau

$$e^2 = mv^*r_n$$

înlocuind această valoare a lui e^2 în iniţială, formula ţinem

$$\frac{r}{71} = \frac{1\ h^2n^2\ 1}{4rt^2\ m\ mi'nr_n}$$

sa

$$(2w_n)^2 = \frac{h^2 n}{2}$$

în fine, extrăgînd rădăcina pătrată din ambele părţi ale acestei ecuaţii, obţinem:

$$2nr_n = n\frac{h}{mv_n}$$

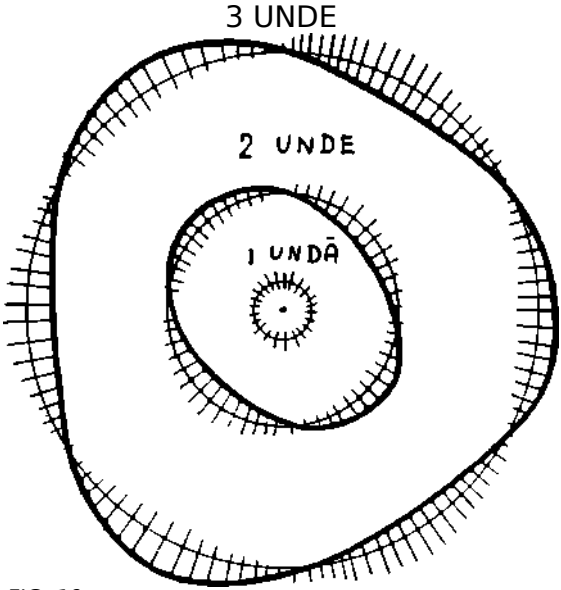


FIG. 19.
Undele de Broglie amplasate pe orbitele cuantice în modelul atomic al lui Bohr.

Astfel, dacă lungimea X a undei care acompaniază electronul este egală cu constanta *h,* a lui Planck, împăiţită prin impulsul particulei *mv,* atunci

$$\mathbf{X} = \frac{}{\boldsymbol{mv}}$$

i>ar de Broglie putea să satisfacă dorinţa sa de a introduce unde de o astfel de natură încît *1,* 2, *3 dintre ele să poată intra exact în 1, a 2-a, a 3-a din orbitele cuantice ale lui Bohr* (fig.19). Rezultatul obţinut este echivalent matematic cu condiţia cuantică iniţială a lui Bohr şi nu aduce, din punct de vedere fizic, nimic nou—nimic decît *o idee:* mişcarea electronilor de-a lungul orbitelor cuantificate ale lui Bohr este acompaniată de unde misterioase avînd lungimea determinată de masa şi viteza particulelor aflate în mişcare. Dacă aceste unde reprezintă un fel de realitate fizică, ele

trebuie să acompanieze de asemenea şi particulele care se mişcă liber în spaţiu, caz în care existenţa sau inexistenţa lor poate fi probată prin experienţă directă. Intr-adevăr, dacă mişcarea electronilor este ghidată de *unde de Broglie* în condiţii corespunzătoare un fascicul de electroni va demonstra fenomene de difracţie similare cu acelea caracteristice pentru fasciculele de lumină. Fasciculele de electroni accelerate de tensiuni electrice de cîţiva kilovolţi (care sînt utilizate în mod curent în experienţele de laborator) vor fi acompaniate, potrivit formulei lui de Broglie, de unde pilot cu lungimi de undă de IO"[8] cm, lungimi comparabile cu lungimile de undă ale razelor X obişnuite. Aceste lungimi de undă sînt prea scurte pentru a da fenomene de difracţie în reţelele optice obişnuite şi trebuiesc studiate cu ajutorul tehnicii standard din spectroscopia razelor X. In metoda aceasta, fasciculul incident este reflectat de suprafaţa unui cristal, iar straturile cristaline vecine, amplasate la o distanţă de circa IO"[8] cm, au acelaş rol ca şi liniile mai îndepărtate din reţelele optice de difracţie (fig. 20). Această experienţă a fost făcută, simultan şi independent, de Sir George Thomson (fiul lui Sir J.J.Thomson) în Anglia şi de G.Davisson şi L.H.Germer în Statele Unite, care au folosit un dispozitiv de cristal asemănător cu cel al lui Bragg şi Bragg şi au înlocuit doar fasciculul de raze X cu un fascicul de electroni cu o viteză dată. Drept rezultat al experienţelor s-a obţinut pe un ecran (sau pe o placă fotografică) un desen caracteristic de difracţie, iar benzile de difracţie deveneau mai late sau mai înguste atunci cînd viteza electronilor incidenţi era crescută sau micşorată. In toate cazurile, lungimea de undă măsurată a coincis în tocmai cu cea care rezulta din formula lui de Broglie. In felul acesta, undele de Broglie au devenit o realitate fizică indiscutabilă, cu toate că nimeni nu înţelegea ce ar putea ele să fie.

Ceva mai tîrziu, un fizician german, Otto Stern, a demonstrat existenţa fenomenelor de difracţie şi în cazul fasciculelor atomice. Deoarece atomii sînt de

mii de ori mai masivi decît electronii, era de aşteptat ca undele de Broglie să fie, pentru aceeaşi viteză, corespunzător mai scurte. Pentru a face ca lungimile de undă de Broglie ale atomilor să fie

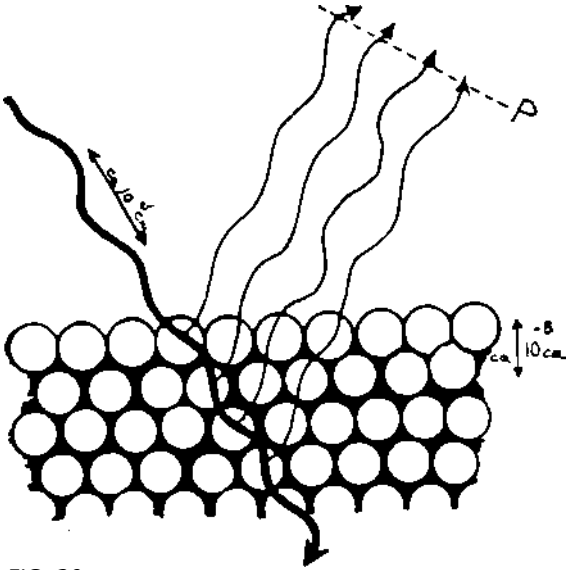


FIG. 20.
O undă incidență, fie ea o undă electromagnetică scurtă (raze X) sau o undă de Broglie asociată unui fascicul de electroni rapizi, la trecerea prin straturile succesive ele rețelei cristalului dă naștere la unde reflectate, in funcție de unghiul de incidență, apar franjuri întunecoase şi luminoase de interferență (P este *planul fazelor).*

comparabile cu distanţele dintre straturile cristalului (circa IO^{-8} cm), Stern a decis să folosească mişcarea termică a atomilor, deoarece putea să regleze în mod foarte simplu viteza acestora, modificînd temperatura gazului. Sursa era constituită dintr-un cilindru ceramic încălzit de o spiră electrică bobinată în jurul acestuia. La un capăt al cilindrului care era închis, era prevăzută o mică fantă prin care atomii scăpau cu viteza lor termică într-un dispozitiv mult mai mare, vidat, şi în zborul lor prin spaţiu ei se loveau de o bucată de cristal amplasată în drumul lor. Atomii reflectaţi în diferitele direcţii izbeau nişte plăci de metal răcite cu aer lichid, iar numărul de atomi ce cădeau pe diferitele plăci era numărat printr-o metodă complicată de microana- iză chimică. Trasînd curba care reprezenta numărul de atomi trimişi în

diferitele direcţii, în funcţie de unghiul de reflexie, Stern a obţinut şi de data aceasta un desen perfect de difracţie, corespunzînd întocmai lungimilor de undă calculate cu formula lui de Broglie. Iar benzile deveneau mai largi sau mai înguste, atunci cînd se modifica temperatura cilindrului.

Pe la sfîrşitul deceniului al treilea, cînd lucram la Universitatea Cambridge cu Rutherford, am hotărît să-mi petrec vacanţa de crăciun la Paris (unde nu fusesem încă nici odată). I-am scris lui de Broglie, spunîndu-i că aş dori foarte mult să-l întîlnesc, pentru a discuta unele probleme ale teoriei cuantelor. El mi-a răspuns că universitatea va fi închisă, dar că va fi bucuros să se întîlnească cu mine la dîn- sul acasă. Locuia într-un magnific castel familial, în distinsa suburbie pariziană Neuilly-sur-Seine. Uşa a fost deschisă de un majordom cu aer solemn.

— „Je *veux voir Professeur de Broglie*[******]'.

— *„Vous voulez dire, Monsieur le Duc de Broglie",* a răspuns majordomul.

— „O.K., *le Duc de Broglie"*, am spus, şi am fost invitat în casă[1].

De Broglie, îmbrăcat într-o haină de casă, din mătase, m-a primit în cabinetul lui de studii somptuos mobilat şi am început să discutăm fizică. El nu vorbea de loc englezeşte; franceza mea era mai degrabă săracă. Dar, într-un chip oarecare, în parte utilizînd frînturile mele de franceză, în parte scriind formulele pe hîrtie, am reuşit să-i comunic ceea ce doream să-i spun şi să înţeleg comentariile sale. In cursul aceluiaş an, de Broglie a venit la Londra pentru a ţine o conferinţă la Royal Society şi, desigur, am făcut parte din auditoriu. El a avut o dicţiune strălucitoare, într-o engleză perfectă, doar cu un foarte slab accent franţuzesc. Am înţeles atunci unul din principiile sale; cînd străinii vin în Franţa, ei trebuie să vorbească franţuzeşte.

Cîţiva ani mai tîrziu, planificîndu-mi o excursie în

****** „Aş dori să-l văd pe profesorul de Broglie". „Vreţi să spuneţi, pe domnul Duce de Broglie" „O.K., pe Ducele de Broglie*'. — *N.T.*

Europa, şi avînd invitaţia Iui de Broglie pentru a ţine o conferinţă specială la Institutul „Henry Poincar6“,al cărui director era de Broglie, am hotărît să fac faţă bine pregătit. Am planificat să-mi scriu conferinţa în franceza mea (încă) săracă pe bordul vaporului cu care urma să străbat Atlanticul, apoi să rog pe cineva la Paris să corecteze textul şi să-l folosesc drept note pentru conferinţă. Dar, după cum fiecare cunoaşte, toate hotărîrile bune se prăbuşesc într-un voiaj peste ocean, care oferă foarte multe distracţii şi a trebuit să fac faţă auditoriului de Ia Sorbona complet nepregătit. Conferinţa s-a desfăşurat oarecum şontîc-şontîc, dar franceza mea a rezistat şi fiecare a înţeles ce am vrut să spun. După conferinţă, i-am spus lui de Broglie că sînt necăjit că n-am putut să-mi îndeplinesc planul iniţial, acela de a-mi fi corectat notele scrise în franceză. „Mon dieu,“ a exclamat dînsul, „este o fericire că n-aţi făcut-o.“

Şi de Broglie mi-a povestit despre o conferinţă ţinută de cunoscutul fizician englez R.H.Fowler. Se ştie foarte bine că, deoarece engleza este cea mai bună limbă din lume, englezii sînt de părere că toţi străinii trebuie s-o înveţe, în felul acesta dînşii eliberîndu-se de necesitatea de a învăţa orice altă limbă. Deoarece conferinţa de la Sorbona urma să fie ţinută în franţuzeşte, Fowler şi-a pregătit un text complet în limba engleză pe care l-a trimis în prealabil lui de Broglie, care l-a tradus personal în franceză. Şi astfel Fowler a ţinut conferinţa în limba franceză folosind un text bătut la maşină. De Broglie mi-a povestit că după conferinţă, un grup de studenţi a venit la dînsul şi i-au spus: „Monsieur le Professeur, noi sîntem tare uimiţi. Ne-am aşteptat ca profesorul Fowler să ţină conferinţa în engleză, căci noi toţi cunoaştem suficient engleza pentru a fi putut să-l înţelegem. El n-a vorbit însă înengleză, ci într-o altă limbă şi nu ne putem da seama în ce limbă a vorbit". „Iată că, adaugă de Broglie, a trebuit să le spun că profesorul Fowler, şi-a ţinut conferinţa în franceză!"

ECUAŢIA DE UNDĂ A LUI SCHRODINGER

Elaborînd ideea revoluţionară că mişcarea particulelor atomice este ghidată de nişte unde pilot misterioase, de Broglie nu a reuşit să dezvolte o teorie matematică strictă a acestui fenomen şi, în anul 1926, cam la un an după publicaţia lui de Broglie, a apărut un articol ai fizicianului austriac, Erwin Schrodinger, care dădea o ecuaţie generală a undelor lui de Broglie şi demonstra validitatea acesteia pentru toate tipurile de mişcare ale electronului. în timp ce modelul lui de Broglie al atomului se asemăna mai mult cu un instrument de coarde neobişnuit, sau mai degrabă cu un set de inele metalice concentrice oscilante, avînd diferite diametre, modelul lui Schrodinger constituia o analogie apropiată cu instrumentele de suflat; în atomii săi, oscilaţiile au loc în întreg spaţiul care înconjură nucleul atomic.

Să considerăm un disc plat de metal asemănător cu un talger fixat în centru (fig.21, a). Dacă-1 lovim, el va începe să oscileze bordura sa, mişcîndu-se periodic în sus şi în jos (fig.21, *b).* Există de asemenea şi alte moduri mai complicate de oscilaţie (armonice), ca în desenul din fig. 21,c, în care centrul talgerului şi toate punctele amplasate pe o circumferinţă (însemnată în figură printr-o linie groasă) sînt în repaus, astfel că atunci cînd materialul din interiorul circumferinţei arcuieşte în sus, materialul din afară a acesteia coboară, şi invers. Punctele şi liniile aflate în nemişcare, de pe o suprafaţă elastică oscilantă, se numesc punctele şi liniile *nodale*- fig. 21, c poate fi extinsă, desenînd armonice superioare care corespund la două sau mai multe cercuri nodale în jurul punctului central nodal.

In afara acestor oscilaţii „radiale" există de asemenea „oscilaţii azimutale", în care liniile nodale sînt constituite de linii drepte care trec prin centru, aşa cum se arată în fig. 21, *d* şi e, în care săgeţile indică dacă membrana se ridică sau coboară în raport cu poziţia orizontală de echilibru.

Desigur, în cazul unei membrane date, oscilaţiile radiale şi azimutale pot avea loc simultan. Starea de mişcare complexă rezultantă poate fi descrisă cu ajutorul a două numere întregi n_r şi n_a care dau numărul liniilor nodale, radiale şi azimutale.

în ordinea complexităţii urmează oscilaţiile tridimensionale ca acelea, de exemplu, pentru undele sonore în aerul care umple o sferă de metal rigidă. în cazul acesta, este necesar să introducem un al treilea mod de linii nodale şi, corespunzător, un al treilea număr întreg $n_($ care dă numărul acestora.

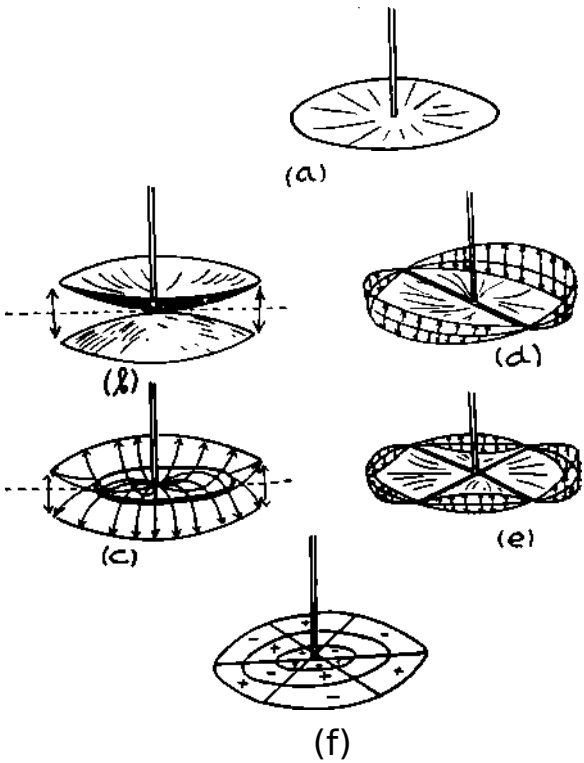


FIG. 21.
Diferite moduri de oscilaţie a unui disc elastic fixat în centru: a — stare de *repaus:* b — *punct nodal în centru; c — o linie nodală circulară; d — o linie nodală radială; e — două linii nodale radiale; f— trei linii nodale radiale şi două circulare.*

Acest tip de oscilaţii a fost studiat cu mulţi ani înainte în acustica teoretică şi în particular Herman von Helmholtz a făcut, în secolul trecut, o serie de studii sistematice asupra vibraţiilor aerului închis în sfere rigide de metal (rezonatorii lui Helmholtz). El a perforat o mică fantă în sferă pentru a putea introduce din exterior prin ea un sunet, şi a utilizat o sirenă care emitea un ton pur, a cărui înălţime putea fi modificată continuu, variind viteza de rotaţie a discului sirenei. Atunci cînd frecvenţa sunetului sirenei coincidea cu una din oscilaţiile

posibile ale aerului din sferă, se observa rezonanţa. Aceste experienţe au fost în perfectă concordanţă cu soluţiile matematice ale ecuaţiei de undă pentru sunet, ecuaţie care este prea complicată pentru a fi discutată in această carte.

Ecuaţia scrisă de Schiodinger pentru undele de Broglie este foarte asemănătoare cu binecunoscuta ecuaţie a undelor pentru propagarea sunetului şi a luminii (adică a undelor electromagnetice) cu deosebirea că timp de cîţiva ani a rămas un mister *ce anume oscila.* La această chestiune vom reveni în capitolul următor.

Atunci cînd în atomul de hidrogen un electron se mişcă în jurul unui proton, situaţia este intr-o anumită măsură similară cu oscilaţia unui gaz intr-un recipient rigid sferic. Dar, în timp ce în rezonatorii lui Helmholtz gazul este împiedicat de către peretele rigid al sferei să se extindă, electronul atomic este supus atracţiei electrice a nucleului central, ca- re-i frînează mişcarea atunci cînd electronul se îndepărtează de centru, şi îl opreşte cînd depăşeşte limita permisă de energia sa cinetică. în ambele cazuri situaţia este arătată grafic în fig.22. In figura din stînga „groapa de potenţial" (adică coborîrea energiei potenţiale în vecinătatea unui punct anumit) se aseamănă cu un perete cilindric ; în figura din dreapta, se aseamănă mai mult cu o groapă în formă de pîlnie săpată în pămînt. Liniile orizontale reprezintă nivelele de energie cuantificată, cea mai joasă din ele corespunzînd energiei celei mai joase pe caie o poate poseda particula. Comparînd fig. 22 6, cu fig. 12, din capitolul II, vedem că nivelele atomului de hidrogen calculate pe baza ecuaţiei lui Schrodinger sînt identice cu acelea obţinute cu ajutorul vechii teorii a lui Bohr a orbitelor cuantificate. Aspectul fizic este însă complet diferit. In loc de a mai avea orbite nete, circulare sau eliptice, de-a lungul cărora călătoresc electroni punctiformi, acuma avem un atom plin, reprezentat prin vibraţiile multiforme a ceva care, în primii ani ai mecanicii ondulatorii, a fost numit, în lipsa unui nume mai

bun, o funcţie (litera greacă *psi).*

Trebuie să menţionăm aici că distribuţia rectangulară a potenţialului arătată în fig. 22 as-a dovedit a fi foarte utilă în descrierea mişcării protonului şi neutronului în interiorul nucleului atomic şi că, ulterior, a fost utilizată cu suc-

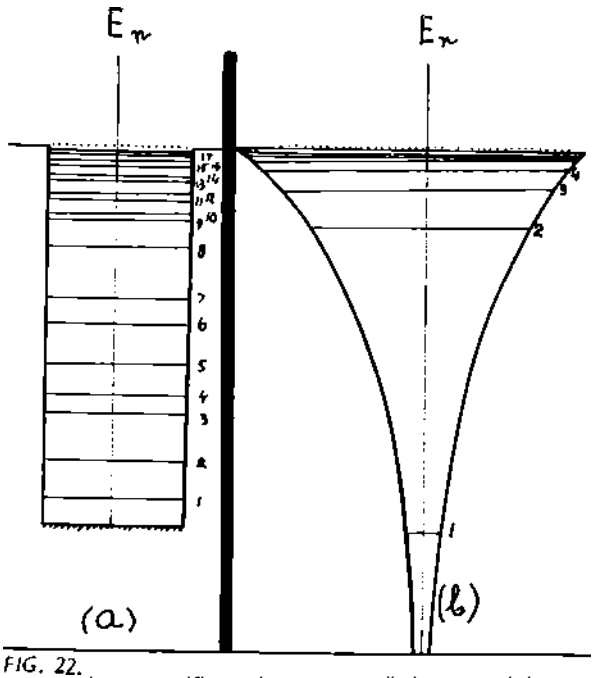


FIG. 22.
Nivelele energetice cuantificate intr-o groapă de potenţial rectangulară (a) *şi in cazul unei gropi de potenţial în formă de pilnie* (b).

ces de Maria Goeppert Mayer, şi independent de Hans Jen- sen, pentru explicarea nivelelor energetice în interiorul nucleelor atomice şi a originei spectrelor razelor y ale diferitelor nuclee radioactive.

Frecvenţele diferitelor moduri de oscilaţie tp nu corespund frecvenţelor undelor luminoase emise de atom, ci valorilor energiilor diferitelor stări cuantice divizate prin *h.* Astfel, emisia unei linii spectrale necesită excitarea a două moduri de vibraţie, fie ŞÎ 'Pm rezultînd frecvenţa compusă.

$$\frac{Em}{mn} \frac{E_n}{h} \frac{E_m - E_n}{h} \sim h$$

care este aceeaşi cu cea care rezultă din expresia lui Bohr pentru frecvenţa cuantei de lumină care rezultă din tranziţia unui electron atomic de la

nivelul de energie E_m, la nivelul de energie mai coborît E_n.

APLICAREA MECANICII ONDULATORII

In afara faptului că dădea o fundamentare mai raţională ideii iniţiale a lui Bohr asupra orbitelor cuantificate şi că înlătura unele discrepanţe, mecanica ondulatorie s-a dovedit în stare să explice o serie de fenomene care erau mult în afara posibilităţilor vechii teorii cuantice. Aşa cum s-a menţionat în capitolul II, autorul cărţii de faţă şi, independent, o echipă formată din Ronald Gurney şi Edward Con- don au utilizat cu succes ecuaţia de undă a lui Schrodinger pentru explicarea emisiei de particule a de către elementele radioactive, precum şi a pătrunderii acestora în nucleele altor elemente uşoare şi a transformărilor de elemente care rezultă. Pentru a înţelege aceste fenomene destul de complicate, vom compara nucleul atomic cu o fortăreaţă înconjurată din toate părţile de ziduri înalte, în fizica nucleară analogul zidurilor fortăreţei este cunoscut ca *barieră de potenţial.* Datorită faptului că atît nucleul atomic, cit şi par- ticula a poartă o sarcină electrică pozitivă, există o puternică forţă de respingere de tip Coulomb, forţă care acţionează asupra particulei care se apropie de nucleu.†††††† Sub acţiunea acestei forţe o particulă a împuşcată în nucleu poate fi oprită şi respinsă înainte ca aceasta să intre în contact nemijlocit cu nucleul. Pe de altă parte, particulele a care sînt incluse în diferitele nuclee ca părţi constituente ale acestora sînt împiedicate să scape din nucleu de nişte foarte puternice forţe nucleare de atracţie (analoge forţelor de coeziune din lichidele

†††††† In timpul primelor studii asupra fenomenelor electrice, fizicianul francez Charles de Coulomb a stabilit căforţele care acţionează între particulele încărcate sînt proporţionale cu produsul sarcinilor lor electrice şi invers proporţionale cu pătratul distanţelor dintre ele. Această este cunoscută ca legea lui Coulomb.

obişnuite), dar aceste forţe nucleare acţionează numai cînd particulele sînt împachetate strîns, fiind în contact direct unele cu altele. Combinaţia acestor două forţe formează o barieră de potenţial care împiedică particulele din interior de a scăpa în afară şi pe cele din exterior de a

intra înăuntru, pînă cînd energia cinetică a acestora nu este suficient de puternică pentru a le căţăra peste culmea barierei de potenţial.

Rutherford a stabilit experimental că particulele a emise de diferitele elemente radioactive, ca de exemplu uraniu şi radiu, au energii cinetice cu mult mai mici decît acelea necesare pentru a depăşi bariera. Se cunoştea, de asemenea, că atunci cînd se ţinteşte cu particule a cu energii cinetice mai mici decît cele necesare pentru a depăşi bariera de potenţial ele pătrund totuşi, adesea, în nucleele bombardate dinafară, producînd transformări nucleare artificiale. In conformitate cu principiile de bază ale mecanicii clasice, ambele aceste fenomene sînt absolut imposibile, astfel că nici un fel de dezintegrare nucleară spontană avînd drept rezultat emisia de particule a şi nici un fel de transformări nucleare artificiale sub influenţa unui bombardament a nu pot să existe. Şi totuşi, ambele au fost observate experimental!

Dacă situaţia este considerată din punctul de vedere al mecanicii ondulatorii, ea apare complet diferită, deoarece mişcarea particulelor este guvernată de undele pilot ale lui de Broglie. Pentru a înţelege modul în care mecanica ondulatorie explică aceste evenimente, imposibile din punct de vedere clasic, trebuie să amintim că mecanica ondulatorie este faţă de mecanica clasică newtoniană în aceeaşi relaţie ca şi optica ondulatorie faţă de vechea optică geometrică. In conformitate cu legea lui Snell, o rază de lumină care cade pe suprafaţa unei sticle sub un unghi oarecare de incidenţă *i* (fig. 23, *a)* suferă o refracţie sub un unghi mai mic r, fiind satisfăcută condiţia

sin i/sin r = n, unde *n* este indicele de refracţie al sticlei. Dacă inversăm situaţia (fig. 23, *b)* şi îndrumăm o rază de lumină, care se propagă prin sticlă, să iasă în aer, unghiul de refracţie va fi mai mare decît cel de incidenţă şi vom avea relaţia *sin ijsin r = 1/n.* In felul acesta, o rază de lumină care cade pe suprafaţa interioară dintre sticlă şi aer, sub un unghi de incidenţă mai mare decît o anumită valoare critică, nu va mai intra de loc în aer şi va fi în întregime reflectată în sticlă. în conformitate cu teoria ondulatorie a luminii, situaţia se prezintă altfel. Undele de lumină care suferă o reflexie internă totală nu sînt reflectate de graniţa matematică dintre cele două

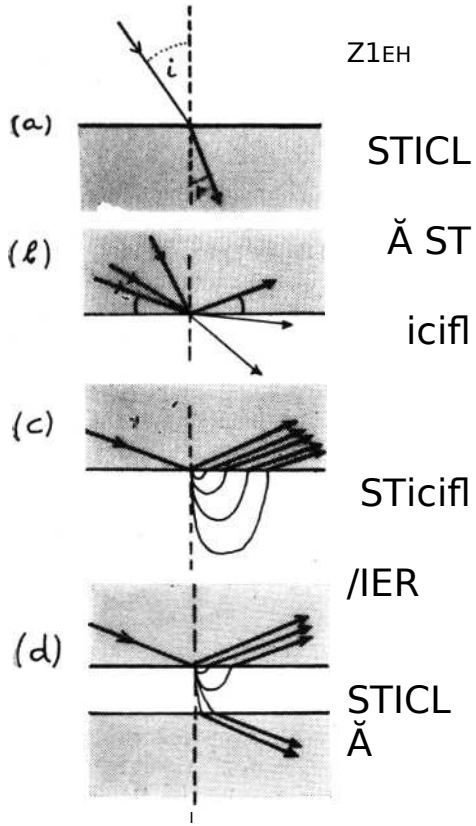


FIG. 23.
Analogia dintre mecanica ondulatorie şi optica ondulatorie. în (a) este *reprezentat desenul familiar al refracţiei luminii care trece dintr-un mediu mai puţin dens fntr-unul mai dens. în* (b) *avem cazul invers în care lumina trece ■din mediul mai dens, in cel mai puţin dens şi în care poate fi reflectată total pe suprafaţa de despărţire, dacă unghiul de incidenţă depăşeşte o anumită •valoare critică. în conformitate cu teoria ondulatorie a luminii, reflexia are loc nu pe suprafaţa matematică care separă cele două medii, ci în interiorul unui oarecare strat cu grosime de cîteva lungimi de undă. în felul acesta, dacă ol doilea strat din mediul mai dens este amplasat la cîteva lungimi de undă distanţă de primul strat, o fracţiune a luminii incidente nu va fi reflectată total, ci va intra în stratul al doilea, mai dens, continuînd propagarea In direcţia iniţială. în acelaşi mod, în conformitate cu mecanica ondulatorie, unele particule pot străbate prin regiunile interzise de mecanica clasică, regiuni în care potenţialul este mai înalt decît energia cinetică iniţială a particulelor.*

W. Heisenberg jucîndu-se la «rece» (fotograf necunoscut)

E. Fermi jucîndu-se la «cald» (fotografiat de autor)

substanţe, ci pătrund în cel de al doilea mediu (în cazul nostru în aer), pe o adîncime de cîteva lungimi de undă X şi pe urmă sînt aruncate înapoi în mediul iniţial (fig. 23, c). Ga urmare, dacă vom plasa o a doua placă de sticlă la o distanţă de cîteva lungimi de undă (în cazul luminii vizibile, la cîţiva microni), o parte oarecare a luminii care intră în aer va atinge suprafaţa sticlei şi, ca urmare, se va propaga în continuare în direcţia iniţială (fig.23, *d).* Teoria acestui fenomen poate fi găsită în cărţile de optică publicate cu un secol în urmă şi constituie o demonstraţie standard în majoritatea cursurilor universitare de optică.

In mod analog,undele de Broglie, care constituie ghidul mişcării particulelor a şi al altor proiectile atomice, pot pătrunde în regiunile din spaţiu care sînt interzise pentru particule, în conformitate cu mecanica clasică newtoniană, şi în felul acesta particulele a,protonii etc.pot depăşi bariere de potenţial a căror înălţime este mai mare decît energia particulei incidente. Din punct de vedere fizic însă probabilitatea de pătrundere are importanţă numai pentru particule cu masă atomică, şi pentru bariere nu mai largi decît 10 ”^{12} sau 10 "^{13}cm. Să considerăm, de exemplu, un nucleu de uraniu care emite o particulă a la un interval de circa 10^{10} ani. O particulă a, prizonieră în interiorul barierei de potenţial a uraniului ajunge la zidul barieră cam de IO^{21} ori pe secundă ceea ce înseamnă că şansa de a scăpa după o simplă încercare este una din 10^{10} X 3-IO^{7} X IO^{21} = 3-IO^{38} lovituri (3 • IO^{7} este numărul de secunde într-un an). Tot astfel, şansele ca un proiectil atomic să pătrundă în interiorul unui nucleu sînt foarte mici pentru fiecare lovitură individuală, dar pot deveni considerabile dacă sînt implicate un număr foarte mare de coliziuni nucleare. Fritz Houtermans şi Robert Atkinson au arătat în anul 1929 că ciocnirile nucleare provocate de mişcarea termică intensivă;cunoscute ca *reacţii termonucleare,* constituie cauza producerii de

energie în Soare şi stele. Fizicienii lucrează acuma din greu pentru a realiza aşa-numitele „reacţii termonucleare controlate" care ar furniza surse de energie nucleară ieftine, inepuizabile şi nenocive. Toate acestea nu ar fi fost posibile, dacă mecanica clasică newtoniană nu ar fi fost înlocuită cu mecanica ondulatorie a lui de Broglie-Schrodinger.

W. HEISENBERG SI PRINCIPIUL DE NEDETERMINARE

Simultan cu articolul lui Schrodinger asupra mecanicii ondulatorii, care a apărut în revista „Annalen der Physik“, într-o altă revistă germană, „Physikalische Zeitschrift“, a apărut un articol al lui Werner Heisenberg de la Universitatea din Gottingen, consacrat aceluiaşi subiect şi conducînd la exact aceleaşi rezultate. Dar, spre marea uluire a fizicienilor care au citit cele două articole, autorii porneau de la presupuneri fizice complet diferite, foloseau metode matematice în întregime diferite şi păreau să nu aibă nimic comun între ele.

Aşa cum s-a arătat în capitolul precedent, Schrodinger considera mişcarea electronilor atomici ca fiind guvernată de un sistem de unde de Broglie tridimensionale generalizate care înconjură nucleul atomic şi a căror frecvenţe şi forme de oscilaţie sînt determinate de cîmpul forţelor electrice şi magnetice. Pe de altă parte, Heisenberg lua în considerare un model mai abstract. El trata atomul ca şi cum acesta ar fi compus dintr-un număr infinit de oscilatori liniari „virtuali[11], ale căror frecvenţe coincideau cu toate frecvenţele posibile pe care atomul în chestiune putea să-l emită. Astfel, în timp ce în tabloul lui Schrodinger emisia unei linii spectrale de

frecvenţă $v_{m>n}$ era considerată ca „un rezultat al cooperării'‡‡‡‡‡‡ a două funcţii oscilatorii[1] $<p_m$ şi $<ţ_n$, în modelul lui Heisen- berg aceeaşi linie spectrală era emisă de un oscilator individual pe care îl putem denumi $V_{m>n}$-

In mecanica clasică, un oscilator liniar este caracterizat prin două numere: deplasarea de la poziţia de echilibru *q* şi viteza lui, *v,* ambele cantităţi variind periodic în timp. Se obişnuieşte în mecanica superioară să se folosească în locul vitezei *v* impulsul§§§§§§ *p,* definit ca produsul dintre masa particulei şi viteza acesteia *(p = mv).* Pentru o lege dată a forţei, care acţionează asupra oscilatorului, acesta posedă o frecvenţă v, bine definită. Spectrul optic însă posedă o dublă mulţime de frecvenţe, care poate fi reprezentată printr-un tabel:

”11	”12	”13	”14	”15	”16	etc
”21	,”22	”23	”24	”25	' ”26	etc
”31	”32	”33	”34	”35	”36	etc
”41	”42	”43	”44	”45	”46	etc

‡‡‡‡‡‡ Pentru simplitate, noi folosim aici un singur număr cuantic în loc de trei pentru a caracteriza fiecare mod de oscilaţie.

§§§§§§ Noţiunea de *impuls,* pe care Isaac Newton îl numea *cantitate de mişcare,* a fost introdusă în cartea sa *Principiile matematice ale filozofiei naturale* şi a rezultat din combinarea legii a doua şi a treia de mişcare. Dacă două particule, aflate iniţial în repaus, interacţionează între ele, forţele de acţionare şi F_a sînt numeric egale şi dirijate în direcţii opuse. Pe de altă parte, vitezele cîştigate în perioada de interacţiune *(v_x* şi v_2) sînt invers proporţionale cu masele (m, şi *m_2)* celor două particule. Astfel, „cantităţile de mişcare[11] (sau impulsurile, cum le numim astăzi) sînt egale numeric şi opuse ca direcţie. Aceasta constituie vestita *Lege a conservării impulsului.*

etc. etc. etc. etc. etc. etc. etc

Reţele de numere de această formă erau cunoscute de mult de matematicieni, ca *matrice,* şi au fost folosite cu mult succes pentru rezolvarea diferitelor probleme algebrice.

Matricele pot fi *finite* dacă indicii *m* şi *n* parcurg toate numerele întregi cuprinse intre 1 şi un număr dat, sau *infinite,* dacă şi *m* şi *n* parcurg tot şirul natural al numerelor, pînă la infinit. A fost dezvoltată o ramură specială a matematicilor, in care fiecare matrice dată (finită sau infinită) poate fi reprezentată printr-un singur simbol, tipărit cu aldine. Astfel, **a** semnifică matricea:

[a]ll	[a]12	[fl]13	*[a]14*	*[a]15*	*[a]l«*	[a]17	etc
[fl]21	[a]22	[a]23	*[a]24*	*[a]25*	*[a]2»*	^27	etc
®3	[fl]32	[fl]33	*[a]34*	[fl]35	*[a]3«*	*[a]37*	etc
etc.	etc.	etc.	*etc.*	etc.	etc.	*etc.*	etc

Întocmai ca numerele obişnuite, matricile pot fi adunate, scăzute, înmulţite şi împărţite între ele. Regulile de adunare şi scădere sînt similare cu acelea ale numerelor obişnuite: se adună sau se

= (
(
(
(

scad termen cu termen. De exemplu:

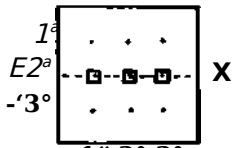
Din această definiţie rezultă că adunarea matricelor re**a + b = b + a,** *b + a.* Leg matricelor sîr[illegible] termenul din

a[n] [a]*1* ± ^12 [a]*13* ± ^13 etc ,
[a]2 ± &21 [a]*2* ± *b*2*2* [a]*23* ± ^23 etc =
i ^3i [a]*3* ± ^*32* [a]*33* ± ^33 etc
et etc etc

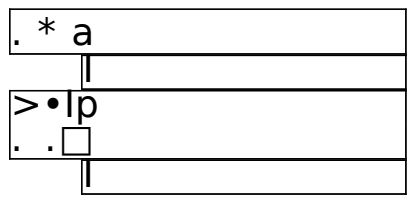
trebuie să multiplicăm termen cu termen tot şirul de termeni din linia *m* a lui a, prin tot şirul de termeni din coloana a n-a a lui b şi să adunăm toate aceste produse intre ele. Schematic, această regulă

poate fi reprezentată prin diagramele de mai jos, în care punctul din produs

înconjurat de un cerc este dat de suma produselor punctelor plasate in pătrate:



sau:



Pentru a ne familiariza mai bine cu acest procedeu, vom folosi ca elemente ale matricelor numere în loc de litere şi vom calcula produsul a două matrice:

pentru	1 3 5 2 5 1 4 3 2	x	3 5 4 1 1 1 2 3 5	obţinem	16 23 32 13 18 18 19 29 29

deoarece 1x3 + 3x14-5x2 = 16; Ix5 + 3xl + 5x3 = = 23; etc.

Să inversăm acuma ordinea factorilor şi să calculăm:

pentru	3 5 4 1 1 1 2 3 5	x	13 5 2 5 1 4 3 2	obţinem	29 46 28 7 11 8 28 36 23

Rezultatul este cu totul altul decît în primul cazi *Legea, comutativităţii înmulţirii, atît de obişnuită în*

aritmetică şi in algebra obişnuită, nu mai este valabilă în calculul matricial! Acesta este motivul pentru care calculul matricial se numeşte *algebră necomutatioă.* Trebuie să menţionăm aici că nu toate perechile de matrice dau în mod necesar rezultate diferite cînd se inversează ordinea factorilor.Dacărezultatul este acelaşi, se spune că cele două matrice *comută;* dacă rezultatul este diferit, ele *nu comută.*

împărţirea matricelor se defineşte în acelaşi mod ca şi în al
algebra obişnuită, unde $\frac{1}{b}$ (in- $\overline{b}$ a- — , iar valoarea lui

necomutativ $-\frac{a}{b}$ unde $\frac{1}{b}$ îndeplineş
te

b- — = 1 si

$$1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \text{etc.} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \text{etc.} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \text{etc} \\ \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc} & \text{etc.} & \text{etc.} \end{vmatrix}$$

versul acestui număr) respectă condiţia $b \cdot \frac{1}{b} = 1$.
în algebra

condiţi
a

	v12	v13	^14	etc
V21	v22	v23	V24	et
V31	v32	V33	v34	etc
etc.	etc.	etc.	etc.	et

atunci şi cantităţile mecanice ca vitezele, impulsurile etc. pot să fie scrise în forma de

Ideea lui Heisenberg a fost că deoarece frecvenţele liniilor spectrale emise de un atom constituie o matrice infinită
matrice. Astfel, impulsurile şi coordonatele urmează a fi date de matricele

Pa	*P12*	*P13*	*Pu*	etc
Pa	*P22*	*P23*	*Pat*	etc
Pai	*P32*	*P33*	*Pat*	etc
etc.	etc.	etc.	etc.	etc

şi

9n	*912*	913	914	etc
?21	*922*	923	924	etc
931	*932*	?33	934	etc
etc.	etc.	etc.	etc.	etc

în care valorile individuale p_{mn} şi q_{mn} oscilează cu frecvenţele v_{mn} date în matricea de mai sus.

înlocuind pe *p* şi *q* în ecuaţiile mecanicii clasice, Heisenberg spera să obţină frecvenţele individuale şi amplitudinile diferiţilor oscilatori „virtuali". A fost totuşi necesar încă un pas pentru a obţine rezultatul final. în mecanica clasică *p* şi *q* sînt numere obişnuite şi prin urmare nu există nici o diferenţă în calcule cînd se scrie *pq* sau *qp.* Matricile p şi q nu comută **(pq#^qp)** astfel că trebuie introdus un postulat suplimentar pentru a stabili ce anume este diferenţa dintre **pq** ŞÎ **qp-** Heisenberg a stabilit că această diferenţă, care este de asemenea o matrice, este egală cu matricea unitate I înmulţită cu un coeficient numeric obişnuit pe care l-a ales *h[2m.* Astfel, condiţia suplimentară se scrie:

$$\mathbf{pq - qp = \frac{}{2KI} I.}$$

Adăugind această condiţie la ecuaţiile clasice ale mecanicii, scrise în formă matricială, el a obţinut un sistem de ecuaţii care dădeau valorile corecte ale frecvenţelor şi ale intensităţilor relative ale liniilor spectrale, identice cu rezultatele obţinute de Schrodinger care folosise ecuaţia sa de undă.

Identitatea neaşteptată a rezultatelor obţinute de mecanica ondulatorie a lui Schrodinger şi de mecanica matricială a lui Heisenberg, care păreau

să nu aibă nimic comun atît în premisele fizice cît şi în tratarea matematică, a fost explicată de Schrodinger în unul din articolele sale următoare. El a reuşit să demonstreze că, oricît ar părea de necrezut la prima vedere, mecanica sa ondulatorie este identică cu mecanica matricială a lui Heisenberg şi că, în fapt, una poate fi dedusă din alta. Era tot atît de surprinzător ca şi cum ai fi afirmat că balenele şi delfinii nu sînt peşti ca rechinii şi heringii, ci animale asemănătoare cu elefanţii şi caii! Faptul este însă fapt şi astăzi se utilizează mecanica ondulatorie-matricială alternativ, depinzînd de gust şi comoditate. In particular, în calculele intensităţilor de radiaţie se utilizează elemente de matrice calculate pe baza mecanicii ondulatorii.

RENUNŢAREA LA TRAIECTORIILE LINIARE CLASICE

în pofida faptului însă că noua teorie cuantică, fie în formă ondulatorie, fie în cea matricială, dădea o descriere matematică perfectă a fenomenelor atomice, ea nu reuşea să facă lumină în tabloul fizic. Ce semnificaţie fizică urma să fie dată acestor unde misterioase, acestor matrice derutante? în ce raport se găsesc ele cu noţiunile noastre bazate pe bun simţ asupra materiei şi lumii în care trăim? Răspunsul la această întrebare l-a dat Heisenberg într-un articol publicat în anul 1927. Heisenberg îşi începe discuţia cu o referinţă la teoria relativităţii a lui Einstein, care în momentul publicării sale (şi în unele cazuri şi astăzi) a fost considerată de mulţi fizicieni eminenţi ca fiind în contradicţie cu bunul simţ. Ce este „bunul simţ"? Vestitul filozof german, Im- manuel Kant (despre ale cărui lucrări autorul are doar o slabă cunoştinţă) ar defini acest concept probabil în felul următor: „Bunul-simţ? Mda, bunul simţ este modul în care lucrurile par că trebuie să fie". Şi apoi, dacă ar fi întrebat: „Ce înseamnă

modul în care lucrurile par că trebuie să fie“? El ar putea să răspundă: „Ei, înseamnă aşa cum ele au fost întotdeauna"*******.

Einstein a fost, probabil, primul care a înţeles faptul important că noţiunile de bază şi legile naturii, cu toate că sînt bine stabilite, sînt valabile numai în cadrul limitelor observaţiei şi nu trebuie să fie în mod necesar adevărate, în continuare, şi dincolo de aceste limite. Pentru popoarele de cultură antică, Pămîntul era plan, dar cu siguranţă că el nu a fost aşa pentru Magellan, nici pentru cosmonauţii

******* Această conversaţie imaginară se află în exclusivitate în mintea autorului şi nu poate fi atribuită lui Immanuel Kant.

moderni. Noţiunile fizice de bază, de spaţiu, timp **şi mişcare** erau bine stabilite şi supuse bunului simţ pînă cînd **ştiinţa** a depăşit limitele care mărgineau pe oamenii de ştiinţă **din** trecut. In acel moment a apărut o puternică **contradic**ţie, in esenţă datorată experienţelor lui Michelson **relative** la viteza luminii, contradicţie care l-a forţat pe Einstein **să** părăsească ideile vechi **ale** „bunului simţ“ asupra **evaluării** timpului, măsurării distanţei şi asupra mecanicii şi **l-au** condus la formularea teoriei „de non-bun simţ" a relativităţii. **A** rezultat că pentru viteze foarte mari, pentru distanţe **foarte** mari şi pentru intervale de timp foarte mari lucrurile **nu** sînt „cum ar fi trebuit să fie“.

Heisenberg considera că o situaţie asemănătoare **s-a creat** în domeniul teoriei cuantice şi el a purces să stabilească **care** anume lucruri din mecanica clasică a particulelor **materiale** nu mai sînt valabile atunci cînd se trece în domeniul **feno**menelor atomice. în acelaşi mod în care Einstein a **pornit** la analiza critică a inconsistenţei fizicii clasice, în **domeniu)** relativistic, prin criticarea unor noţiuni de bază ca *simultaneitatea* a două evenimente aflate la o distanţă **dată,** Heisenberg a atacat noţiunea de bază a mecanicii **clasice,** aceea de *traiectorie* a unui corp material aflat în mişcare. Din timpuri imemoriale traiectoria a fost definită **ca dru**mul parcurs de un corp care se mişcă în spaţiu. In **cazul li**mită folosit în calculele matematice, „corpul[11] era un **punct** matematic (care nu are dimensiuni, după cum l-a **definit** Euclid) în timp ce „drumul[11] era o linie matematică **(care nu** are grosime, potrivit aceluiaşi autor). Nimeni nu se **îndoia că** acest caz limită constituie descrierea cea mai bună **posibilă** a mişcării şi că micşorînd erorile experimentale **asupra** stabilirii coordonatelor şi vitezei particulei în mişcare, **noi** ne-am putea apropia din ce în ce mai mult **de descrierea** exactă a mişcării.

Heisenberg a ridicat obiecţii. El sublinia că în **timp ce** această afirmaţie ar fi fără îndoială adevărată dacă **lumea ar** fi guvernată de legile fizice clasice, existenţa **fenomenelor** cuantice poate

să răstoarne situaţia. Să examinăm **întîi o** experienţă ideală în cadrul căreia se încearcă să se **determine** traiectoria unei particule cu masă, să zicem în **cîmpul gra**vitaţional al Pămîntului. Pentru aceasta construim **o ca**meră şi evacuăm aerul din ea, pînă cînd în interior nu **mai**

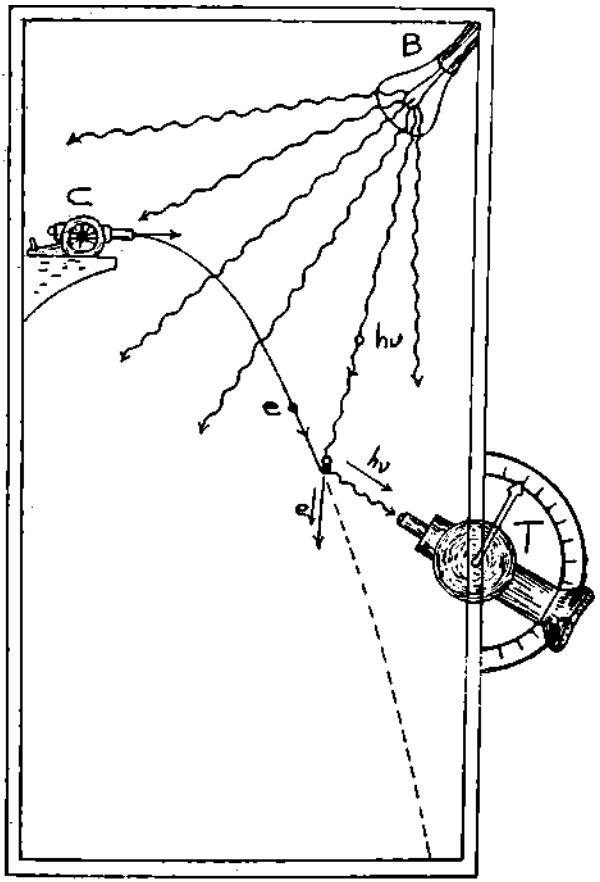


FIG. 24
Microscopul cuantic ideal al lui Heisenberg pentru interpretarea relaţiilor de nedeterminare: ApAq h.

rămine nici o singură moleculă (fig. 24). Pe peretele acestei camere instalăm un mic tun, *C,* care împuşcă un obuz de masăm şi viteză *v,* să zicem în direcţie orizontală. Pe peretele opus al camerei este amplasat un mic teodolit, T, care poate fi îndreptat asupra particulei în cădere, urmărindu-i drumul. Camera e3te iluminată de o lampă

electrică, *B,* din plafon. Lumina becului este reflectată de particula în cădere şi intră în tubul teodolitului, poziţia particulei fiind indicată fie pe retina ochiului observatorului, fie pe o placă fotografică.

Deoarece experienţa pe care o facem este una ideală, trebuie să luăm în considerare toate efectele posibile care poţ perturba mişcarea particulei şi într-adevăr noi găsim unul, chiar dacă tot aerul a fost evacuat. Atunci cînd lumina becului este reflectată în tubul teodolitului, ea exercită asupra particulei o anumită presiune, care va determina o deviere a particulei de la traiectoria sa aşteptată, parabolică. Poate fi făcută această perturbare neglijabil de mică, infinit de mică?

Să procedăm pas cu pas şi să estimăm la început doar zece poziţii ale particulei; aprindem becul numai de zece ori în timpul căderii şi în felul acesta eliminăm efectul presiunii luminii în timpulcînd particula nu este observată. Să presupunem că la prima încercare efectul celor zece şocuri provocate de lumina reflectată deviază particula prea departe de traiectoria aşteptată. Găsim atunci un remediu foarte uşor. Reducem intensitatea luminii cu factorul necesar deoarece în fizica clasică nu există o limită inferioară pentru cantitatea de energie radiată care poate fi emisă într-o aprindere, precum şi vreo limită a sensibilităţii receptorului luminii reflectate. Reducînd intensitatea, putem deci să micşorăm perturbarea totală în timpul zborului particulei, pînă la o valoare mai mică decît a oricărui număr e, oricît de mic am dori să-l alegem. Dacă decidem apoi să mărim numărul poziţiilor observate de zece ori, pentru o definire mai precisă a traiectoriei, va trebui să aprindem becul de o sută de ori pe timpul zborului. Efectul presiunii radiaţiei de-a lungul întregului zbor va creşte în mod corespunzător şi perturbarea totală poate deveni mai mare decît e. Pentru a face faţă situaţiei, vom utiliza un bec de zece ori mai slab şi un receptor de zece ori mai sensibil. Următorii paşi

ne vor obliga să facem o mie, zece mii, o sută de mii etc. observaţii, folosind în mod corespunzător becuri mai slabe şi detectori mai sensibili. La limită, vom obţine un număr infinit de observaţii, fără a perturba traiectoria cu mai mult decît E. Trebuie luat în considerare şi un alt aspect. Indiferent cît de mic ar putea să fie punctul în mişcare, imaginea sa optică pe ecran mi **poate** fi, datorită fenomenelor de difracţie, mai mică decît lungimea de undă X a luminii folosite. Acest impediment poate **fi la** rindul său remediat, micşorind X şi folosind în locul luminii vizibile, lumină ultravioletă, raze X şi raze y din ce in **ce mai** dure. Deoarece în fizica clasică nu există o limită in**ferioară** pentru lungimea undelor electromagnetice, dia**metrul** fiecărei imagini de difracţie poate fi făcut, pe calea **aceasta,** oricît de mic îl dorim. Procedînd în felul acesta, **putem** observa un drum oricît de fin dorim, fără a perturba mişcarea totală cu mai mult de e. Iată cum in cadrul fizicii **clasice** putem construi conceptual noţiunea de traiectorie **ca** linie, în sensul euclidian al cuvîntului.

Are însă acest mod euclidian vreo corespondenţă cu reali**tatea?** Nu, răspunde Heisenberg. El susţine că acest mod de a **proceda** în experienţa noastră ideală devine imposibil, da**torită** existenţei cuantelor de lumină. Intr-adevăr, cea mai **mică** cantitate de energie purtată de o „strălufgerare de **lumină“** este egală **cu** *h* v, care corespunde unui impuls mecanic *hv/c.* In reflectarea strălufgerării către teodolit, o parte din **acest** impuls va fi comunicată particulei, modificînd mo**mentul** acesteia cu:

$$\Delta p \cong \frac{\cdots}{c}$$

în felul acesta, creşterea numărului de observaţii determină **creşterea** perturbării traiectoriei dincolo de orice limită, şi **particula,** în loc **dea** se mişca de-a lungul unei parabole, va **executa** o mişcare

browniană, fiind aruncată încoace şi în**colo** în toate direcţiile prin cameră. Singura cale de a mic**şora** perturbarea este micşorarea lui v, care, datorită rela**ţiei v** = c/X, semnifică mărirea lungimii de undă pînă cînd **aceasta** capătă dimensiunea camerei. Atunci, în loc de a ve**dea** mici scîntei care să sară ici-colo pe întreaga suprafaţă a ecranului, vom observa un sistem de spoturi de difracţie **mari,** suprapuse, care vor acoperi întreg ecranul. Astfel că, **prin** această metodă, nu putem obţine nimic care să se **asemene cu linii matematice.**

Singura alternativă posibilă este să căutăm un compromis. **Va** trebui să folosim fotoni cu o frecvenţă care să nu fie prea Înaltă şi cu o lungime de undă care să nu fie prea mare. Deoarece indeterminarea *&q* in stabilirea de către noi **a po-**ziţiei particulei este X = c/v, vom obţine:

$$\underline{\mathrm{Av}} = \frac{h}{c\ \mathrm{X}}$$

sau

&pb.q h

care††††††† ‡‡‡‡‡‡ §§§§§§§ constituie faimoasa relaţie de indeterminare a lui **Hei-** senberg. Exprimată în viteze, această relaţie devine:

$$\mathrm{Av}\ \check{a}q = \frac{}{m}$$

care arată că devierile de la mecanica clasică devin **impor**tante numai în cazul maselor foarte mici. Pentru o **parti**culă de 1 mg obţinem:

$$\mathrm{Av\ A?} = \frac{10\text{-}2?}{\overline{\mathrm{IO}\text{-}»}} = \mathrm{IO}''^{24}$$

---

††††††† Această relaţie se prezintă adesea cu semnul *Si,* semn if ic în d **„apro**
‡‡‡‡‡‡‡ximativ egal cu“, sau ~ semnificînd „de ordinul de mărime al“, **sa»**
§§§§§§§ca în fig. 24, cu semnificînd „mai mare sau egal cu“.

care poate fi satisfăcută, de exemplu, luînd:

$$Av = IO^{-12} \frac{}{sec}; \quad Au = IO^{-12} \text{ cm}$$

Astfel, potrivit acestei relaţii, viteza unei alice mici **eBte im**precisă cu 0,3 metri/secol şi imprecizia poziţiei sale este **com**parabilă cu diametrul nucleului atomic. Evident, **nimeni nu** se va sinchisi de asemenea incertitudinii Pe de altă **parte,** pentru un electron cu masă de IO^{-27} g, avem

$$Av \; A \; o \; \frac{10^{-«}}{7 \; 10-”} = 1$$

Deoarece afirmaţia că electronul este in interiorul **atomu**lui semnifică faptul că Ag^l0~^{8}cm, rezultă că incertitudinea vitezei sale este

$$IO^{-3} \; Av = \frac{}{} = 10® \frac{}{sec}$$

Incertitudinea asupra energiei cinetice care corespunde la această incertitudine asupra vitezei este

$\&K = mv\&v$ - IO^{-27}-IO^{-8}-10“^{8} = IO^{-11} erg 10 e.v. energie care este comparabilă cu energia totală de legătură a unui electron în atom. Este evident că în astfel de împrejurări este lipsit de sens să sedeseneze orbitele electronilor în atom de-a lungul unor linii, deoarece lăţimile acestor linii vor fi comparabile cu diametrele orbitelor cuantice ale lui Bohrl

S-ar putea obiecta că traiectoria unei particule poate fi observată printr-o altă metodă decît cea optică, care conduce la dificultăţile descrise, uzînd nişte dispozitive mecanice de un ţip oarecare, distribuite prin spaţiu şi să se înregistreze trecerea particulelor pe lîngă ele, poate nişte „clopoţei*[1] care să înceapă să sune cînd sînt lovite de particulele în trecere. Perturbarea apare însă din nou şi aici. Să presupunem că dispozitivul de înregistrare este constituit dintr-o particulă care se poate mişca într-un recipient de rază Z. Această particulă, fiind cuantificată, posedă un şir de stări cuantice ale căror impulsuri se deosebesc prin cantităţile

$$\mathrm{Ap}_{l}—$$

astfel că dacă şocul particulei incidente provoacă mutarea dispozitivului de pe o stare cuantică pe alta, particula incidenţă piercTe o parte substanţială a impulsului său. Insă *l* este incertitudinea Aş în poziţia particulei incidente, deoarece ea poate să lovească dispozitivul de înregistrare în orice punct al suprafeţei acestuia. în felul acesta, obţinem şi aici din nou

$$\mathrm{Ap\ A\text{ş}}\ h$$

şi in.c^zul măsurătorilor făcute cu metode mecanice. Menţionăm aici că această metodă a clopoţeilor este foarte larg utilizată în fizica nucleară experimentală, sub numele de camera cu ceaţă, în care atomii ionizaţi ai gazului (cu vapori

de apă condensaţi asupra lor) formează lungi urme care indică mişcarea diferitelor particule atomice. însă urmele camerelor cu ceaţă nu sînt linii matematice şi sînt în realitate mult mai groase decît ar permite-o relaţia de incertitudine.

Deoarece în fizica atomică şi nucleară noţiunea de traiectorii liniare clasice nu mai corespunde, apare inevitabil necesitatea elaborării unei alte metode pentru a descrie mişcarea particulelor materiale şi aici ne vin în ajutor funcţiile Ele nu reprezintă nici o realitate fizică. Spre deosebire de undele electromagnetice, undele de Broglie nu posedă masă şi prin urmare dacă, în principiu, se poate cumpăra o jumătate de kilogram de lumină roşie, nu există în lume nici măcar un gram de unde de Broglie. Ele nu sînt mai materiale decît traiectoriile liniare ale mecanicii clasice şi de fapt pot fi descrise ca „linii matematice lăţite". Ele ghidează mişcarea, particulelor în cadrul mecanicii cuantice în acelaşi sens în care în cadrul mecanicii clasice traiectoriile liniare ghidează mişcarea particulelor. Dar, exact în acelaşi fel în care noi nu putem considera orbitele planetare din sistemul solar ca un fel de linii ferate care forţează planetele Venus, Marte şi Pămîntul nostru să se mişte de-a lungul unor orbite eliptice, noi nu putem considera nici funcţiile continue ale mecanicii ondulatorii ca un fel de cîmp de forţe care influenţează mişcarea electronilor. Funcţiile de undă de Broglie-Schiodinger (sau mai degrabă pătratul valorilor lor absolute, adică | '■]> |^2) determină *probabilitatea* ca particula să se găsească într-o parte sau alta a spaţiului şi că se va mişca cu o viteză sau alta.

Nu putem termina acest capitol fără a reda o discuţie aprinsă între Niels Bohr, care a fost marele promotor al relaţiilor de incertitudine, şi Albert Einstein, care a rămas pînă la moartea sa un convins adversar al acestora. Această discuţie a avut loc la Bruxelles, la al Vl-lea Congres Solvay (1930), care a fost dedicat problemelor teoriei cuantelor şi care implica (după cum se putea aştepta, datorită prezenţei lui Einstein!) relaţia de indeterminare în *patru* coordonate.

Pînă acum, în această carte noi am scris relaţia *ApAq = h* pentru fiecare coordonată luată în parte, ca şi pentru impulsul corespunzător. într-un sistem

de coordonate cartezian tridimensional avem însă totdeauna trei relaţii independente:

$$Ap_sAx\ h$$

$$Ap\hat{}Ar/\ h$$

$$\&p_z\&z\ h$$

Deoarece în teoria relativităţii *timpul* (în forma[4] *el)* **este** considerat ca a patra coordonată, iar *energia* (în forma *E/c)* ca a patra componentă a impulsului, ne putem aştepta să existe o a patra relaţie de incertitudine şi anume

AE Az A

şi tocmai această temă a provocat incidentul de la Congres.

Einstein s-a ridicat şi a anunţat că el poate propune o ex**perienţă** ideală care infirmă această a patra relaţie. El s-a **gîndit** la o cutie îmbrăcată cu oglinzi ideale (asemănătoare cu **cutialui** Jeans, despre care s-a vorbit în capitolul I) şi umplută **cu o** cantitate oarecare de energie radiantă. într-unul din **pereţi** este amplasat un obturator fotografic idealizat, co**nectat** cu un ceas de alarmă, de asemenea idealizat, care să **fie** astfel aranjat, încît să comande obturatorul la orice **timp** dorit, începînd din momentul umplerii cutiei cu ra**diaţie** (fig. 25). Deoarece ceasul este în interiorul cutiei, iar obturatorul închis, interiorul cutiei este în completă izolare **faţă** de lumea exterioară. Einstein a propus să se cîntă- **rească** cutia înaintea acţiunii ceasului de alarmă; dacă **se acordă** un timp suficient, cîntărirea poate fi făcută cu orice precizie dorită. Obturatorul se va deschide exact în mcmen- **tul** în care este prevăzut să acţioneze ceasul de ala r ir ă **şi,** ca urmare, o anumită cantitate de energie radiantă *E* **va** fi pierdută în afară. După ce obturatorul se închide din **nou,** cutia poate fi cîntărită din nou, cu orice precizie do**rită.** Modificarea masei cutiei —M_1 poate fi obţinută cu **orice** precizie dorită, din cele două măsurători, şi,

înmulţind-o **apoi cu** c^2, ea va da cantitatea exactă a energiei emise, ast**fel că AE =** 0. Pe de altă parte, ceasul ideal va acţiona per**fect,** încît nu vom avea nici o indeterminare asupra timpului **la care** a fost emisă energia, astfel că şi Az = 0. Avînd AE = 0 **simultan** cu Az = 0, a patra relaţie de indeterminare este **ucisă.**

Argumentarea apărea ca foarte convingătoare şi Bohr nu a **avut** nimic de spus. In dimineaţa următoare însă, după o **noapte** aproape fără somn, Bohr, cu o faţă care radia, a apărut **tnsala** de conferinţă cu explicaţia. Pentru a cîntări cutia, sub-

• **In** care $c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/s este viteza luminii în vid.

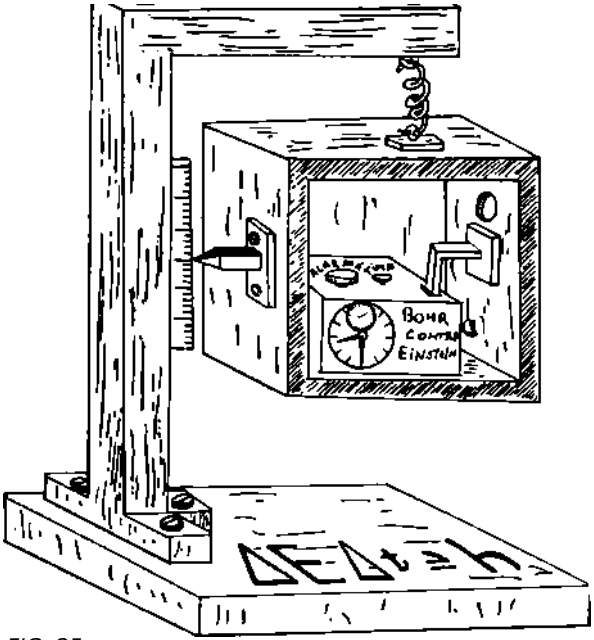
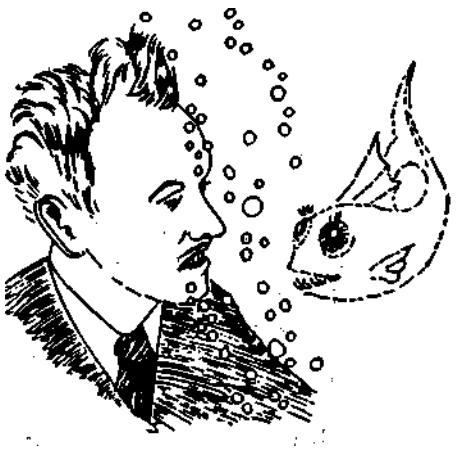


FIG. 25
Experienţa ideală a lui Bohr, care infirmă teza lui Einstein cum că relaţia AEAt *h ar fi falsă.*

liniael,va trebui săpermitem ca aceasta să se mişte pe direcţia verticală, indiferent dacă se foloseşte o balanţă sau un cintar cu arc. Ceasul, modificindu-şi poziţia in cîmpul gravific al pămîntului, va pierde sau va cîştiga timp în conformitate cu legea lui Einstein referitoare la influenţa potenţialului gravific asupra perioadei ceasului. Drept urmare, va fi provocată o incertitudine Ai asupra momentului acţionării obturatorului. Pe de altă parte, amplitudinea oscilaţiilor verticale ale cutiei, care determină pe AZ, este legată de modificarea masei care, datorită pierderii de energie, provoacă oscilaţiile cutiei, prin relaţia obişnuită Ap_zAz^A. Cuplînd ecuaţiile, Bohr ajungea cu uşurinţă la concluzia căAEAZ^A, respingînd in felul acesta argumentul lui Einstein, folosind în acest scop una

din cele mai importante descoperiri ale lui Einstein însuşi.

Capitolul de faţă s-a ocupat în principal de principiul lui Heisenberg şi nu de trăsăturile personale ale acestuia. Autorul poate însă adăuga că Heisenberg a fost un schior aproape profesionist, juca ping-pong cu mîna stingă şi, în pofida marei lui faime ca fizician, era cunoscut la Leipzig (unde lucra ca profesor) ca un pianist de mîna întîi.



P.A.M. DIRAC ŞI ANTIPARTICULELE

Teoria relativităţii şi teoria cuantelor, care au apărut aproape simultan la începutul secolului actual, au constituit două mari explozii ale minţii umane şi au zguduit bazele înseşi ale fizicii clasice: relativitatea, în cazul vitezelor apropiate de viteza luminii; cuanta, în cazul mişcărilor restrînse la dimensiuni foarte mici (atomice). Dar, de-a lungul aproape a trei decenii, aceste două mari teorii au rămas mai mult sau mai puţin izolate. Teoria iniţială a lui Bohr asupra orbitelor cuantificate, ca şi ecuaţia undelor, a lui Schrodinger, prin care a fost ulterior dezvoltată au fost esenţialmente nerelativiste; amîndouă erau aplicabile numai particulelor care se mişcau cu viteză mică în raport cu cea a luminii. Vitezele electronilor în interiorul atomului nu sînt însă aşa de mici. De exemplu, electronul de pe prima orbită a hidrogenului are o viteză, calculată pe baza teoriei lui Bohr, de 2,2 X 10^8cm/s, care este mai mică decît viteza luminii doar cu ceva mai puţin de 1%. Viteza electronilor din interiorul atomilor mai grei este considerabil mai mare. Desigur, cîteva procente nu înseamnă aşa de mult, iar valoarea calculată putea fi îmbunătăţită, introducând „corecţii relativiste", care puteau să aibă o concordanţă ceva mai bună cu măsurătorile experimentale.. Aceasta

8*

constituia insă doar o îmbunătăţire şi nu o perfecţionare a teoriei.

Şi in problema momentului magnetic al electronului au apărut motive de nelinişte. In 1925, Goudsmit şi Uhlenbeck au arătat că pentru a explica anumite detalii ale spectrelor atomice este necesar să se atribuie electronului anumite momente unghiulare şi magnetice******** ††††††††, cunoscute curent ca fiind *spinul electronului.* La timpul respectiv, reprezentarea naivă asupra electronului considera că acesta este o mică sferă încărcată electric, avînd un diametru de circa 3xl0“[13] cm. Rotirea rapidă a acestei sfere în jurul axei sale era considerată ca fiind sursa momentului magnetic, avînd drept rezultat interacţiuni suplimentare cu momentele magnetice ale altor electroni şi cu mişcarea proprie pe orbită. Rezulta însă că pentru a produce cimpul magnetic necesar, electronul trebuia să se rotească atît de repede incit punctele de la ecuatorul său trebuiau să posede viteze cu mult mai mari decît ale luminii I Iată că şi aici, din nou, se năştea un conflict între fizica cuantică şi cea relativistă. Devenea clar că fizica relativistă şi cea cuantică nu puteau fi pur şi simplu adunate. Devenise necesară o teorie mai generală, care trebuia să conţină, armonios unificate, atît ideile relativiste cît şi cele cuantice.

Cel mai important pas in această direcţie a fost făcut în 1928 de fizicianul englez P.A.M. Dirac, care şi-a început cariera ca inginer electrotehnician şi care, întîmpinînd greutăţi in găsirea unei slujbe mulţumitoare, a făcut o cerere pentru a deveni bursier in fizică la Universitatea din Cambridge. în prezent, cererea sa (care a fost acceptată) este afişată, frumos înrămată, în biblioteca Universităţii, alături de diploma de laureat al Premiului Nobel pe care el a căpătat-o nu cu mulţi ani după ce a trecut de la inginerie la fizica cuantică.

Se intimplă adesea ca in privinţa oamenilor de

******** Vezi FRANCIS BITTER, *Magnets,* Editura Doubleday, Science
††††††††Study Series, 1959.

ştiinţă vestiţi să se nască tot felul de istorii referitoare la „profesorul distrat“. In marea majoritate a cazurilor, aceste istorii nu sînt adevărate, ci mai mult invenţii ale unor glumeţi; in cazul lui Dirac insă aceste istorioare BÎnt adevărate, cel puţin după părerea autorului. Unele din ele le vom povesti aici, pentru folosul viitorilor istorici.

Fiind un mare fizician teoretician, Dirac prefera să teoretizeze problemele vieţii curente, in loc să găsească soluţiile direct din experienţă. Odată la o reuniune la Copenhaga, el a formulat o teorie potrivit căreia trebuie să existe o anumită distanţă optimă de la care faţa unei femei arată cel mai bine. El argumenta că Iad = oo nu se poate vedea nimic, in timp ce la $d = 0$ ovalul feţei este deformat, datorită aperturii mici a ochiului uman, iar multe imperfecţiuni (ca micile riduri) apar exagerate. In consecinţă, există o anumită distanţă optimă la care faţa arată cel mai bine.

„Spune-mi Paul, l-am întrebat, cit de aproape ai văzut vreodată o faţă de femeie?[11]

„O, răspunse Dirac, ţinîndu-şi palmele la o distanţă de circa 60 cm, cam atît de aproape[11].

Ciţiva ani mai tîrziu, Dirac s-a însurat cu „sora lui Wigner[11] cunoscută sub numele acesta printre fizicieni, deoarece este sora cunoscutului fizician maghiar Eugene Wigner. Odată cînd a picat la Dirac unul din vechii săi prieteni, care nu auzise încă de căsătoria acestuia, a găsit acolo o femeie atrăgătoare, care a servit ceaiul şi pe urmă s-a aşezat confortabil într-un fotoliu. „Ce mai faci ,“ a spus prietenul întrebîndu-se cu mirare cine ar putea fi femeia. „O, exclamă Dirac, scuză-mă, am uitat să fac prezentările. Este... este sora lui Wigner[11].‡‡‡‡‡‡‡

Simţul lui Dirac pentru umorul cuantic a fost demonstrat deseori la întîlnirile oamenilor de ştiinţă.

---

‡‡‡‡‡‡‡ Intr-o recentă discuţie cu d-na Dirac (tocmai la Austin, în Texas !) autorul a întrebat-o dacă lucrurile s-au petrecut intr-adevăr aşa. Ea mi-a spus că ceea ce a spus într-adevăr Dirac a fost: „Dînsa e sora lui Wigner, care acum este soţia mea“.

La Copenhaga, odată, Klein şi Nishina comunicau lucrarea lor cu celebra formulă Klein-Nishina care descrie interacţiunile dintre electroni şi cuantele gama. După ce şi ultima formulă a fost scrisă pe tablă, cineva care tocmai citise manuscrisul articolului, a remarcat că formula scrisă pe tablă are termenul al doilea cu semnul minus, în timp ce în manuscris semnul este plus.

— „Da, spuse Nishina, care prezenta materialul, în manuscris semnul este sigur corect , la tablă însă am făcut undeva o greşeală la semn[11].

— „De un număr *impar* de ori!“ a comentat Dirac.

Un alt exemplu al darului de observaţie ascuţit al lui Dirac se referă la literatură. Prietenul său, Petru Kapitza, fizicianul rus, i-a împrumutat o traducere engleză a cărţii lui Dostoievski, *Crimă şi pedeapsă.*

Cînd Dirac i-a înapoiat cartea lui Kapitza, acesta l-a întrebat dacă i-a plăcut.

— „E o carte bună, răspunse Dirac, dar într-unul din capitole autorul a comis o eroare. El descrie Soarele ca răsărind de două ori în aceeaşi zi“. Acesta a fost singurul lui comentariu asupra romanului lui Dostoievski.[3]

Altădată, în vizită la Kapitza acasă, în timp ce discuta fizică cu acesta, Dirac o urmărea pe Ania Kapitza tricotînd. După vreo două ore de la plecare, Dirac a revenit, extrem de agitat. „Ştii, Ania, spuse el, urmărind felul în care tricotai puloverul, a început să mă intereseze aspectul topologic al problemei. Am găsit că mai este şi un alt mod de a-1 realiza şi că, în general, sînt doar două moduri posibile. Unul din ele este acela pe care-1 foloseşti; celălalt este astfel..." şi el a demonstrat acest de al doilea mod, folosindu-se de degetele lui lungi şi fine. „Cel de al doilea mod“, redescoperit de dînsul, este de fapt binecunoscut de mult, constată Ania, şi nu-i altceva decît „tricotatul cu ochiul pe dos“.

Pentru a termina cu „anecdotele Dirac[11], înainte de

a trece la rezultatele lui ştiinţifice, daţi-mi voie să vă povestesc încă una. Cînd s-a trecut la întrebări, după o conferinţă a lui Dirac la Universitatea din Toronto, cineva din auditoriu a remarcat: „Profesore Dirac, n-am înţeles cum aţi dedus formula din partea stîngă, de sus, a tablei[11].

— „Aceasta nu este o întrebare, replică scurt Dirac, ci o declaraţie. Următoarea întrebare, vă rog[11].

[8] Autorul, care ştie acestea de la Kapitza, a fost prea leneş ca să citească *Crimă şi Pedeapsă* încă o dată, pentru a găsi capitolul cu pricina. Cititorii cărţii de faţă ar putea să încerce însă.

UNIFICAREA RELATIVITĂŢII CU TEORIA CUANTICĂ

Să trecem acum la rezultatele lui Dirac în fizică. După cum s-a arătat Ia începutul acestui capitol, teoria cuantică şi teoria relativităţii nu puteau fi potrivite exact una cu alta, ca două piese din jocul chinezesc de figuri. Se poate obţine o potrivire foarte apropiată, dar întotdeauna rămîn unele discrepanţe minore care fac soluţia nu pe deplin corespunzătoare. Ecuaţia de undă a lui Schrodinger, din teoria cuantelor, arăta foarte asemănătoare cu ecuaţia de undă clasică, care descrie propagarea sunetului sau a undelor electromagnetice, dar...

în fizica clasică, cantităţile considerate, fie ele densitatea aerului sau forţele electromagnetice, intră întotdeauna în ecuaţia de undă sub forma *derivatelor de ordinul doi**; adică sub forma vitezelor de modificare a vitezelor de modificare în raport cu *x, y, z* şi *t,* scrise convenţional ca:

$$\frac{d^2u}{dx^2};\quad \frac{d^2u}{\mathbf{0y^2}};\quad \frac{d^2u}{dz^2};\quad \text{Ş}^1\ \frac{d^2u}{dt^2}\bullet$$

Soluţia exactă matematică a unor astfel de ecuaţii conduce întotdeauna la unde armonice, care se propagă prin spaţiu. Ecuaţia de undă a lui Schrodinger conţinea derivatele de ordinul doi în raport cu *x, y* şi z,

dar numai derivata de primul ordin în raport cu *t.* Explicaţia vine de acolo că această ecuaţie fusese dedusă din mecanica clasică newtoniană, în care acceleraţia unui punct material în mişcare este proporţională cu forţa activă. Intr-adevăr, dacă *x* este poziţia particulei, viteza acesteia, *v,* (adică viteza variaţiei poziţiei punctului cu timpul) este *prima* derivată a lui *x* în raport cu *t*

$$\left(\frac{\partial x}{\partial t}\right)$$

[4] Noţiunea de derivată este analizată elementar în capitolul 3 („Calculul infinitezimal") al cărţii autorului, *Gravitaţia,* publicată în 1962, în aceeaşi serie (a apărut şi în Editura Ştiinţifică, Bucureşti, 1966 — *N.T.).* Vezi, de asemenea, *Mathematical Aspects of Physics,* de FRANCIS BITTER, Doubleday, Science Study Series, 1963. în timp ce *acceleraţia* acestuia, *a* ,(adică viteza variaţiei vitezei punctului cu timpul) este derivata de ordinul doi:

$$\frac{\partial\left(\frac{\partial x}{\partial t}\right)}{dt}$$

care se scrie în mod obişnuit

$$S^2x$$

Pe de altă parte, forţa *F* este prima derivată a potenţialului *P* în raport cu poziţia:

$$\frac{ap}{dx}; \quad \frac{ap}{dy} \quad \text{şi} \quad \frac{ap}{8z}$$

astfel că legea de bază a lui Newton asupra mişcării, care afirmă că acceleraţia este proporţională cu forţa, conţine derivatele de primul ordin în raport cu coordonatele spaţiale, şi derivata a doua în raport cu timpul. Acest fapt face ca ecuaţia de mişcare a lui Newton privitoare la o particulă să fie din punct de vedere matematic neomogenă, timpul *t* avînd o situaţie deosebită decît aceea a coordonatelor *x, y, z.* Această situaţie, care dura de secole în mecanica clasică, se

reflectă în mecanica ondulatorie nerelativistă, a lui Schrodinger, în cadrul căreia spaţiul şi timpul sînt tratate ca entităţi complet diferite.

De îndată însă ce încercăm să formulăm legile teoriei cuantice pe o bază relativistă, ne lovim de dificultatea că spaţiul şi timpul sînt mult mai strîns conectate între ele. Intr-adevăr, H. Minkowski, urmînd ideile de bază ale lui Einstein, a formulat noţiunea unui continuu cuadridimen- sional spaţio-temporal în care timpul, multiplicat cu numărul imaginar $i = /—1$, este considerat echivalent cu celelalte trei coordonate spaţiale. în universul lui Minkowski nu există nici o diferenţă între *x, y, z* şi *ict* (unde c este introdus§§§§§§§§ ******** din consideraţii pur dimensionale).

(In această carte, consacrată teoriei cuantelor, nu avem spaţiu pentru a discuta teoria relativităţii în amănunt; cititorul care nu cunoaşte acest subiect, poate să se informeze din alte cărţi††††††††. Autorul trebuie totuşi să presupună că persoanele care citesc capitolele următoare au cel puţin o cunoaştere elementară a ideilor de bază ale teoriei lui Einstein.)

După cum am spus mai înainte, ecuaţia de ur.dă mecanică trebuie să conţină aceleaşi derivate în raport cu tcate cele patru coordonate. Ecuaţia lui Schrodinger însă, fiind dedusă din ecuaţia lui Newton, nu satisface această condiţie. Primele încercări de a înlătura acest defect au fost făcute, independent, de O. Klein şi O. Gordon care au schimbat ecuaţia de undă nerelativistă a lui Schrodinger, dîndu-i o formă relativistă, introducînd pur şi simplu derivatele de ordinul doi în raport cu timpul, în locul derivatelor de ordinul întîi. Dar, cu toate că ecuaţia de undă a lui Klein- Gordon arată foarte elegant şi foarte relativistic, ea suferea de un număr de contradicţii interne şi toate încercările de a introduce spinul electronului în ea, într-un mod oarecare raţianal, au dat totalmente greş.

---

§§§§§§§§ Factorul *c* (viteza luminii) este necesar pentru a păstra corecte
*********dimensiunile fizice.

††††††††•Vezi HERMANN BONDI, *Relativity and Common Sense,* Doub- leday, Science Study Series, 1964.

Şi iată că într-o seară a anului 1928, stînd în biroul său de la Colegiul „St. John“, într-un fotoliu, cu lungile lui picioare întinse spre buştenii care ardeau în cămin, Paul Adrien Maurice Dirac a avut o idee extrem de simplă şi extrem de strălucitoare.

Deoarece nu se poate obţine nici un rezultat corespunzător folosind derivatele de ordinul doi în raport cu coordonata timpului în ecuaţia de undă relativistă, de ce n-am folosi în ea derivatele de ordinul întîi în raport cu coordonatele spaţiale? Desigur, asta ar însemna introducerea mai multor numere imaginare i, dar ar face ecuaţia de undă simetrică în raport cu spaţiul şi timpul. în felul acesta a apărut ecuaţia liniară a lui Dirac (care conţinea numai derivatele de ordinul întîi), ecuaţie care aplicată la atomul de hidrogen a condus de îndată la rezultate strălucite. Toate fragmentările liniilor spectrale care au rezistat cu încăpăţînare interpretărilor în funcţie de spinii şi de momentele magnetice ale electronilor au rezultat în mod absolut corect pe baza noii teorii. Acest succes era în mod cu totul deosebit de surprinzător, deoarece, formulindu-şi ecuaţia, Dirac urmărea doar să o facă corectă din punct de vedere relativist; electronul cu spin a apărut doar ca o bonificaţie pentru unirea într-un mod corect a teoriei relativităţii şi a cuantelor. Şi acesta nu mai era o mică sarcină electrică ca o sferă în rotaţie rapidă, ci o sarcină punctiformă care, datorită ecuaţiei lui Dirac, se comportă *ca şi cum ar fi* un magnet minuscul.

Dar, scriind ecuaţia de undă care constituia o unificare perfectă a teoriei relativităţii şi a cuantelor, Dirac trebuia să facă faţă unei alte dificultăţi care fusese caracteristică pentru toate încercările de unificare a acestor două teorii. In conformitate cu vestita relaţie a lui Einstein, o masă de repaus m_a (exprimată în grame) este echivalentă cu energia $m\$c^2$ (exprimată în ergi), *c* fiind viteza luminii. Dacă această masă se mişcă cu o anumită viteză *v,* posedînd în felul acesta (în primă aproximaţie) energia cinetică[7] $K = — m\hat{}v^2$, energia totală este

£=y^-=^{moc2} + |^2-

Dar[9], în virtutea proprietăţilor matematice ale mecanicii relativiste a lui Einstein, trebuie să ne aşteptăm şi Ia tipul de mişcare care corespunde la energia totală:

$$E = -\frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \cong -m_0c^2 - \frac{1}{2}m_0v^2$$

Această[8] ecuaţie poate fi obţinută din cea anterioară, prin înlocuirea lui + *m$* cu —*m₀,* ceea ce din punct de vedere fizic semnifică introducerea unei *mase negative.* In

[7] Sau, mai exact:

$$m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right) - 1$$

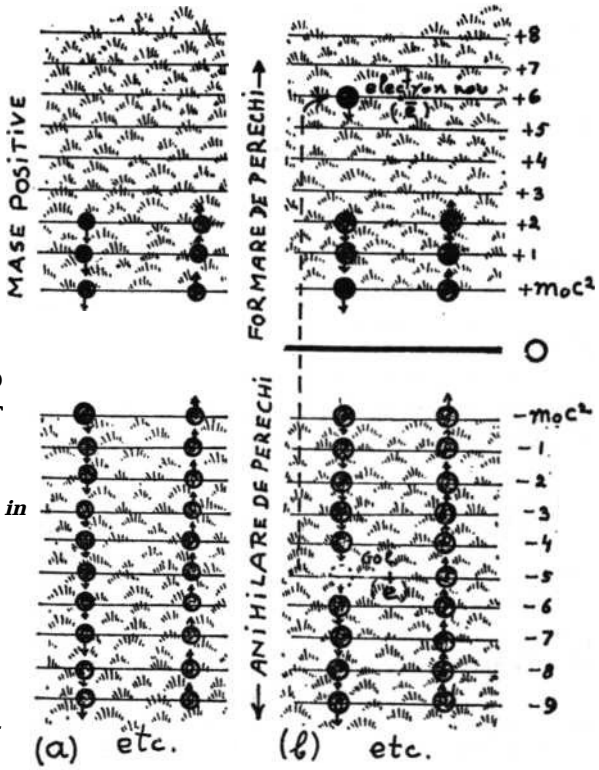
care devine egală cu 1/2 m_0v^2, dacă v < *c.* [8] Pentru *v < e.* felul acesta, mecanica relativistă permite, în principiu, două seturi separate de nivele: acela cu energia de repaus + $^{m}o^{c2}$ şi cu energii mai înalte, şi al doilea cu energia de repaus — TWoC^2 şi mai joase (fig. 26).

în timp ce nivelele de energie reprezentate în partea superioară a diagramei (7?>0) corespund la modurile familiare de mişcare a particulelor materiale (electron, proton etc.), nivelele de energie din partea de jos a diagramei (£<0) nu corespund la nici o realitate fizică. Particule cu masă inerţială negativă nu corespund la nimic observat în natură. într-adevăr, datorită valorii negative a masei lor, ele ar fi accelerate în direcţia *opusă* forţei care acţionează asupra lor şi, pentru a opri din mişcare o particulă de acest fel, ar trebui să o împingem în direcţia mişcării sale şi nu împotriva ei! Să ne imaginăm două particule, fie doi electroni, care au mase numeric egale, dar de semne opuse (+ *m* şi — *m).* In conformitate cu legea lui Coulomb, ele s-ar respinge unele pe altele datorită forţelor electrostatice, care ar avea aceleaşi valori numerice, dar ar acţiona în direcţii opuse. Dacă ambele particule au mase pozitive, interacţiunea dă acceleraţii egale,

dar dirijate în sensuri opuse (fig. 27a) şi ele se vor îndepărta una de alta, cu viteze crescătoare. Dacă una din particule ar avea masă negativă (fig. 27 *b),* ea va fi accelerată în aceeaşi direcţie, ca şi cealaltă particulă şi astfel ele ar zbura împreună, menţinînd o distanţă egală între ele şi căpătînd încontinuu o viteză din ce în ce mai mare (mai mică decît *c* desigur). Aceasta nu este în contradicţie cu legea conservării energiei, deoarece energia cinetică, combinată, a celor două particule va fi:

y mv^2 + y (— $m)v^2$ = 0 aceeaşi cafe era înainte de a se porni mişcarea. Toată situaţia aceasta este fantastică, iar particule cu astfel de proprietăţi n-au fost niciodată observate.

In mecanica clasică relativistă (care nu ia în considerare fenomenele cuantice), dificultatea particulelor cu masă negativă poate fi uşor înlăturată. Într-adevăr, aşa cum se poate vedea din fig. 26, regiunile de energie pozitivă şi negativă sînt separate printr-un interval $2m_0c^2$ (de circa un milion



<u
>
■p
<r
u>
Z
W *in*
<

FIG. 26

Tabloul lui Dirac al distribuţiei nivelelor de energie ale particulelor cu masă pozitivă şi negativă. în stingă, (a), toate *nivelele de energie negativă sînt complet ocupate şi numai şase electroni obişnuiţi pot exista pe nivelele pozitive normale. în dreapta, (b), unul din electronii din nivelul negativ este ridicat la un nivel pozitiv, lăsînd tn locul lui un „gol" care se comportă ca un electron pozitiv obişnuit cu masă pozitivă. Dacă acest electron suplimentar de pe un nivel pozitiv recade intr-un gol (procesul de anihilare a lui e şi e), diferenţa de energie va fi emisă ca radiaţie* Y-

electroni volţi în cazul electronilor). Deoarece în mecanicile necuantice (clasică şi relativistă) schimbările de energie trebuie să fie continue, o particulă din partea superioară

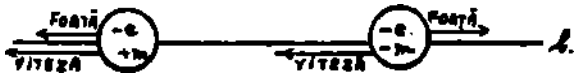


FIG. 27
Interacţiunea între particulele cu masă pozitivă şi cele cu masă negativă.

a diagramei nu se poate deplasa in partea inferioară deoarece aceasta ar implica o schimbare discontinuă a energiei particulei. în felul acesta, în descrierea fizică a naturii, stările cu masă negativă puteau fi înlăturate ca fiind posibilităţi matematice indezirabile. Dar, de îndată ce se introduc fenomenele cuantice, situaţia se schimbă radical: în teoria cuantică, electronii ca şi celelalte particule elementare se complac în a *sări* de la nivelele mai ridicate la nivelele mai joase. Astfel că în cadrul teoriei cuantice relativiste va avea loc un eveniment paradoxal: toţi electronii normali vor sări de la stările cu masă pozitivă la stările cu masă negativă şi întregul univers ar înnebuni I

Singurul mod în care Dirac putea să imagineze depăşirea acestui paradox era folosirea principiului lui Pauli şi consta în a presupune că toate stările care corespund maselor negative sînt în întregime ocupate (cîte doi electroni cu spin opus pe fiecare stare) nemairămânînd vreun loc în care electronii din stările cu masă pozitivă să poată sări. Situaţia este asemănătoare cu cea deja cunoscută a învelişurilor unui atom în care electronul din învelişul *N* nu poate sări în jos, pe învelişurile *L* sau *K,* deoarece acestea sînt complet ocupate de electronii care au venit aici primii. Dar, în timp ce atomii sînt structuri limitate, conţinînd un număr finit de electroni, teoria lui Dirac se referă la un spaţiu infinit şi pretinde un număr infinit de electroni in fiecare centimetru cub de vid şi, cu cît mai departe cuatîtmaibine, pretinde să se neglijeze masa infinită a acestor electroni care, In conformitate cu teoria relativistă a gravitaţiei a lui Einstein (numită uneori teoria relativităţii generale), ai face ca raza de curbură a spaţiului gol să fie egală cu zero !

Lăsînd de o parte această dificultate, Dirac şi-a pus întrebarea dacă această distribuţie de electroni

încărcaţi negativ avînd mase negative ar putea fi observată, adică detectată cu vreun instrument oarecare fizic de măsură. Răspunsul a fost negativ. Cu nici un fel de dispozitiv electric nu poate fi detectată o~distribuţie uniformă' de sarcină In spaţiu, indiferent cît de intensă ăr fi ea pe unitatfea de volum. Pentru a înţelege această afirmaţie, să ne imaginăm un peşte oceanic, de adîncime, care nu se ridică niciodată la suprafaţa oceanului şi niciodată nu coboară pînă la fundul acestuia. Dacă presupunem că apa oceanului este fără frecare (ceva asemănător cu lichidul de heliu) va trebui să ajungem la concluzia că peştele, oricît ar fi de inteligent, nu va putea spune dacă se mişcă prin apă sau într-un vid absblut. Şi, dacă ceva nu poate fi observat, nu trebuie să fie folosit în descrierea fizică a naturii. Peştele nostru de adîncime este obişnuit să vadă diferite obiecte care coboară, fie ele resturi aruncate peste bord de vapoarele care plutesc pe ocean, sau, în cazuri rare, înseşi vapoare care coboară. Astfel că, urmîndu-1 pe Aristotel, peştele va concepe noţiunea de gravitaţie care face ca toate obiectele materiale să se mişte în jos.

Să presupunem acuma că o sticlă goală de Goca-Gola care se scufundă, sau un transatlantic care se soufundă, are o cantitate oarecare de aer captat care este eliberat cînd Acestea se lovesc de fund. Ge va vedea inteligentul nostru peşte? El va vedea un ciorchine de sfere argintii (bule de aer, în limbaj uman obişnuit), care se ridică. Ge va gîndi peştele inteligent observînd aceste obiecte? El va fi uluit că acestea se mişcă în direcţia opusă forţei de gravitaţie şi va fi înclinat să le atribuie o masă cu semn opus faţă de cea a obiectelor obişnuite câre se mişcă în jos.

O analogie ceva mai apropiată poate fi făcută luînd în considerare un atom complex cu învelişurile *K, L* şi *M* completate, care a fost lovit de o rază *X* dură şi a pierdut unul din electronii din învelişul *K.* Va rezulta un spaţiu gol (un loc vacant Pauli) în învelişul *K,* iar unul din electronii învelişului *L* va sări în locul acesta, lăsînd un loc liber în învelişul lui. Următorul pas va fi o tranziţie a unui electron mai agil, din învelişul *N,* în

locul vacant din învelişul *L.* Desigur, există de asemenea posibilitatea ca învelişul *M* să fixeze învelişul *L* şi locul vacant din învelişul *K* să fie ocupat direct de unul din electronii *M.*

FIZICA ANTIPARTICULELOR

Problema poate fi însă considerată şi din alt punct de vedere. Faptul că în învelişul *K* lipseşte un electron negativ este echivalent cu prezenţa unei sarcini pozitive în acest înveliş. Tranziţia unui electron negativ de la învelişul *L,* în jos, la învelişul *K,* este echivalentă cu ridicarea acestei sarcini pozitive de la învelişul *K,* în sus, la învelişul *L* şi, ulterior, în sus, la învelişul *M.* Din acest punct de vedere avem de-a face cu o particulă fictivă, încărcată pozitiv care se mişcă de la nivelul cel mai jos, *K,* la nivelul mult mai înalt, *L,* şi mai departe, în afară, în spaţiul interatomic. Deoarece, în conformitate cu legea lui Coulomb, nucleul încărcat pozitiv trebuie să respingă electronul fictiv încărcat pozitiv, toate-s bune şi la locul lor.

Revenind la oceanul lui Dirac, umplut cu electroni încăr- caţi negativ şi avind mase negative, ne putem întreba cum va recepţiona un experimentator situaţia în care un electron negativ cu masă negativă lipseşte de la nivelul său. Evident, rezultă două concluzii simple: (1) absenţa unei sarcini negative va fi observată ca prezenţa unei sarcini pozitive. Astfel că experimentatorul va observa o particulă cu o sarcină electrică + e; (2) absenţa unei mase negative este echivalentă cu prezenţa unei mase pozitive. în felul acesta, particula va avea o comportare normală şi va fi observată ca o particulă obişnuită încărcată pozitiv. Ajungînd pînă aici, Dirac şi-a extins însă ideea. El a considerat că se poate demonstra că valoareea numerică a masei acestui gol aflat în oceanul electronilor cu masă negativă este aproximativ de 1840 de ori masa unui electron obişnuit. Dacă lucrurile ar sta în realitate astfel, golurile din oceanul lui Dirac ar fi observate ca protoni obişnuiţi.

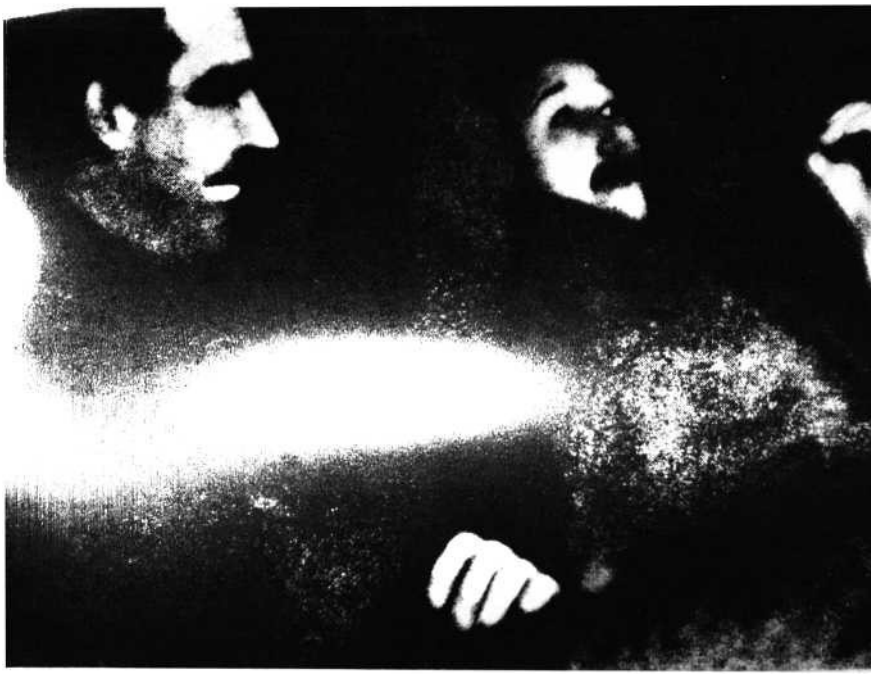
Articolul lui Dirac, publicat în 1930 (sau mai degrabă discuţiile particulare şi corespondenţa

anterioară publicării acestuia), au determinat o opoziţie violentă faţă de această idee. Niels Bohr, care din motive necunoscute autorului acestei cărţi, se interesa de elefanţi, a compus o poveste de vinătoare intitulată *Cum să prinzi elefanţi vii.* El a propus vinătorilor africani de vînat mare, următoarea metodă: la locul de adăpare, pe malul unui riu, unde elefanţii vin să bea apă şi să se spele, se va ridica o pancartă mare, pe care se va expune într-o frază scurtă propunerea lui Dirac. Atunci cînd elefantul, care este un animal proverbial de înţelept, vine să bea apă, citeşte textul pe pancartă şi rămîne pentru cîteva minute vrăjit. Folosind aceste momente vînătorii ascunşi în tufişuri se strecoară afară şi leagă bine cu frînghii groase picioarele elefantului. După aceea, elefantul poate fi îmbarcat pentru Grădina Zoologică Hagen- beck, din Hamburg.

Pauli, căruia de asemenea îi plăcea să glumească, a făcut unele calcule care au arătat că dacă protonii din atomii de hidrogen ar fi golurile lui Dirac, electronii din atomi ar sări în aceste goluri într-o fracţiune neglijabilă de secundă şi atomul de hidrogen (ca şi atomii tuturor celorlalte elemente) s-ar anihila instantaneu, provocînd oexplozie de radiaţie de înaltă frecvenţă. Pauli a propus atunci ceea ce se numeşte „al doilea principiu al lui Pauli“, în conformitate cu care orice teorie sugerată de un teoretician este imediat aplicabilă corpului acestuia. în felul acesta, Dirac ar fi fost transformat în raze gama înainte încă de a fi putut pronunţa măcar ceva despre ideea sa.

S-a glumit, s-a glumit; glumă, glumă dar un an după articolul lui Dirac,un fizician american,Cari Anderson, studiind trecerea electronilor din razele cosmice printr-un cîmp magnetic puternic, a constatat că în timp ce o jumătate dintre aceştia erau deflectaţi în direcţia aşteptată corespunzătoare comportării unor particule încărcate negativ, cealaltă jumătate era deviată cu un acelaşi unghi *în direcţia opusă.* Aceştia erau electronii încărcaţi pozitiv, numiţi uneori pozitroni, prezişi de teoria lui Dirac. Studiile experimentale asupra pozitronilor au arătat că aceştia

se comportă întocmai după cum se presupunea că se vor comporta golurile lui Dirac. Cu toate că pozitronii au fost descoperiţi pentru prima oară în razele cosmice, s-a stabilit curînd că ei pot fi de asemenea produşi în mod simplu şi în condiţii controlate



N. Bohr şi A. Einstein probabil In timpul Congresului Solvay la Bruxelles, în 1930 (fotograf necunoscut)

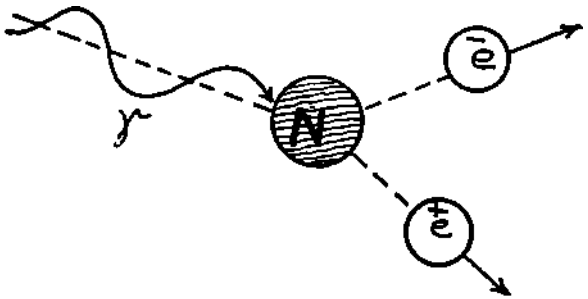
George Gamow discutind pe un vîrf de munte fizică nucleară cu Leon Rosenfeld (fotografiat de Rudolph Peierls)

de laborator, prin iradierea unor plăci de metal cu raze gama dure. Aşa cum se arată în fig. 28a, cuanta gama, cioc- nindu-se cu nucleul atomic, dispare şi întreaga sa energie este convertită în doi electroni, unul negativ şi unul pozitiv. Deoarece masa unui electron exprimată în unităţi de energie, este egală cu 0,5 Mev, procesul are loc numai dacă energia Av a razei f este mai mare decît 1,0 Mev. Surplusul de energie:

$hv \rightarrow + -$

este comunicat perechii de electroni (e, e) „creată" prin ciocniri. Soarta acestor doi electroni este complet diferită. Electronul negativ (obişnuit) e este treptat încetinit prin ciocnirile cu alţi electroni negativi care formează materia şi devine unul din aceştia. Electronul pozitiv e nu trăieşte mult timp, ci este anihilat prin ciocnirea cu unul din electronii negativi (obişnuiţi) emiţîndu-se două cuante y (fig. 28 *b)* Termenii „creaţi" şi „anihilaţi" nu trebuiesc înţeleşi în sens metafizic; se poate tot aşa de bine spune că ghiaţa este „creată" din apă cînd aceasta este adusă sub punctul de îngheţare şi „anihilată" la temperatura camerei, transfor- mîndu-se în apă. Legile de conservare ale masei şi energiei (care în prezent constituie o singură lege datorită formulei lui Einstein $E = znc^2$) sînt respectate în ambele procese, şi avem de-a face aici doar cu o transformare pe baze egale a radiaţiei în particule şi a particulelor în radiaţie.

Detectarea antielectronilor (pozitronilor) a ridicat problema dacă există de asemenea sau nu şi antiprotoni, particule avînd aceeaşi masă ca a protonului, dar purtînd o sarcină negativă. Deoarece protonul este cam de 1840 ori mai greu decît un electron, producerea unei perechi proton-antiproton cere energii de miliarde de electronivolţi şi nu de milioane. Ţinînd seama de aceasta, Comisia pentru Energia Atomică a cheltuit sume proporţionale de dolari pentru a construi acceleratoare care să poată imprima proiectilelor nucleare cantităţile necesare de energie. Şi, în cîţiva ani, în Statele Unite au fost construite două acceleratoare uriaşe: *Bevatronul* de la laboratorul de radiaţii al Universităţii din California, la Berkeley; şi *Cosmotronul* de la laboratorul naţional din Brookhaven, la Long Island, New York.



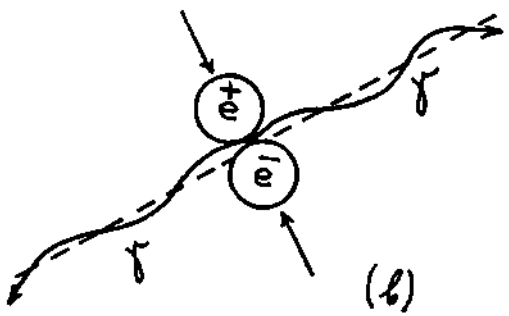


FIG. 28
„Crearea" şi *„anihilarea" electronilor negativi şi pozitivi*
— -r
(e *şi e), in conformitate cu teoria lui Dirac:* (a) o *rază gama de energie mare loveşte un nucleu* (N) *şi se trans-*
— + - +
formă, într-o pereche e şi e; (b) o *pereche* e şi e se *ciocneşte în spaţiul liber şi produce două raze gama ce se mişcă în direcţii opuse.*

Imediat în urmă au fost construite maşini asemănătoare în Europa, la CERN lîngă Geneva, Elveţia, şi în Uniunea Sovietică, lîngă Moscova. A fost ca o întrecere strînsă care în cele din urmă a fost cîştigată de californieni, cînd în octombrie 1955 Emilio Segrâ şi colaboratorii săi au anunţat că au detectat protoni negativi emişi de ţinte bombardate. Ulterior, ei au descoperit de asemenea antineutronii, particule

care anihilează in ciocnirile cu neutronii obişnuiţi. După cum vom vedea mai departe în această carte, toate particulele descoperite mai recent (diferite tipuri de mezoni şi hyperoni) posedă de asemenea antiparticulele lor.

Şi iată că, deşi Dirac nu a avut succes în intenţia sa iniţială de a explica protonul ca un antielectron, a deschis totuşi largul cîmp al fizicii antiparticulelor.

In legătură cu antiparticulele există două mistere nerezolvate. Atomii care formează globul nostru pămîntesc sînt construiţi din electroni negativi, protoni pozitivi şi neutroni obişnuiţi. In conformitate cu studiile astronomice, acelaşi lucru este adevărat in ceea ce priveşte întregul sistem planetar şi însuşi Soarele. In fapt, protonii şi electronii emişi de Soare care pătrund In atmosfera terestră sînt protonii pozitivi şi electronii negativi (obişnuiţi). Mai puţin sigură, dar probabil adevărată, este afirmaţia că toate stelele şi materialul interstelar din Calea Lactee sînt formate din materie obişnuită, deoarece în caz contrar din toate direcţiile galaxiei noastre ar trebui să se observe radiaţii gama intense. Ce se poate spune însă despre miliardele de alte galaxii care sînt separate prin milioane de ani-lumină de Calea Lactee? Este oare universul nostru asimetric, fiind format în întregime din materie „obişnuită", sau este format dintr-o colecţie de galaxii din care o jumătate sînt compuse din materie „obişnuită", iar cealaltă jumătate din „anti- materie"? Noi nu cunoaştem acest lucru şi pare-se că nu există o cale de a-1 afla.

O altă şaradă este aceea, dacă antiparticulele pe care le producem din abundenţă, în acceleratorii noştri moderni au o masă gravifică pozitivă sau negativă. La prima privire se pare că la această întrebare se poate răspunde uşor prin experimentare directă. Intr-adevăr este suficient să se producă într-un accelerator de energie mare un fascicul de antiprotoni care să fie trimis orizontal, de-a lungul unui tub ghidat, şi să se observe dacă sub acţiunea gravitaţiei terestre fasciculul deviază în jos, ca o piatră aruncată orizontal, sau el deviază în sus. Dacă s-ar

întîmpla să fie al doilea caz, el ar putea fi explicat, conchizind că antiparticulele sînt respinse de masa Pămîntului. Elementul turburător este însă că antiparticulele produse în laboratoarele noastre se mişcă cu viteze aproape egale cu aceea a luminii (3 x IO^{10} cm/s). Aşa că, dacă tubul are, să zicem, o lungime de 3 km (3 x 10® cm), antiparticulele îl vor străbate într-un interval de timp de IO^{-5} s. Conform legii căderii libere, ele se vor deplasa în jos (sau în sus în cazul maselor gravifice negative) cu 1/2 gt^2cm, unde g este de circa lCPcm/s^2. Dacă t este egal cu $10^{\sim s}$ s, deplasarea verticală va fi de ordinul 10® X 10^{-10} = $10^{"7}$ cm, distanţă care este comparabilă cu diametrul atomului 1 Este evident că nici un fel de instalaţie experimentală nu este în stare să detecteze o deplasare atît de mică a fasciculului. Pentru a realiza experienţa, s-ar putea însă să se încerce micşorarea vitezei antiparticulelor la viteze mai rezonabile, să zicem la ciţiva centimetri pe secundă, viteze la care devierea în sus sau în jos ar deveni uşor sesizabilă. Cum s-ar putea face însă aceasta? In pilele atomice neutronii sînt frînaţi, făcindu-i să treacă prin diferiţi „moderatori" (carbon sau apă grea) în care neutronii îşi cedează treptat energia lor în interacţiunile cu ceilalţi atomi, în cazul antiparticulelor însă nu putem proceda în modul acesta, deoarece acestea, trecînd prin orice moderator făcut din materie obişnuită, ar fi anihilate de la prima interacţiune. Astfel, problema rămîne încă nerezolvată.

în concluzie, se poate afirma că dovedirea existenţei masei gravifice negative a antiparticulelor ar fi deosebit de folositoare pentru rezolvarea multor probleme cosmologice. Dacă atît particulele obişnuite cît şi antiparticulele ar fi iniţial uniform distribuite în univers, atracţia gravi- fică dintre particulele de acelaşi fel şi respingerea ipotetică gravifică între particulele de tip deosebit ar duce la separarea mutuală a acestora. In felul acesta s-ar forma mari regiuni ale spaţiului, umplute exclusiv cu materie obişnuită şi alte regiuni umplute exclusiv cu antimaterie. O astfel de separaţie ar satisface noţiunii

noastre de simetrie a naturii. Noi nu cunoaştem însă acest lucru şi nu ştim, de asemenea, dacă vreodată îl vom cunoaşte sau nu.

E. FERMI ŞI TRANSMUTAŢIA PARTICULELOR

In timpurile de demult, fiecare fizician putea stăpini atît latura experimentală cît şi cea teoretică a ştiinţei sale. Exemplul cel mai remarcabil îl constituie Sir Isaac Newton, care a creat teoria gravitaţiei universale (elaborînd în scopul acesta disciplina matematică, cunoscută astăzi sub numele de calcul diferenţial). El a efectuat de asemenea importante studii experimentale care au dovedit că lumina albă se formează prin suprapunerea unui spectru de diferite culori, şi a fost primul care a construit un telescop reflector. Pe măsură însă ce cîmpul fizicii a devenit mai larg, tehnicile experimentale şi metodele matematice au devenit din ce în ce mai complicate, mult prea mult pentru ca un singur om, fie el oricine, să le poată stăpîni simultan. Profesia de fizician s-a separat în două ramuri — „experimentatori[11] şi „teoretici- eni". Marele teoretician Albert Einstein nu a efectuat niciodată vreun experiment (cel puţin din cîte cunoaşte autorul), în timp ce marele experimentator Lord Rutherford era atît de slab în matematică, încît faimoasa formulă Rutherford pentru difracţia particulelor a a fost dedusă pentru dînsul de un tînăr matematician, R.H. Fowler. Astăzi, ca regulă, un fizician teoretician nu îndrăzneşte să se atingă de vreo instalaţie experimentală, de frică să n-o defecteze (vezi efectul

Pauli, în capitolul III), în timp ce experimentatorii se simt pierduţi în fluviul turbulent al calculelor matematice.

Enrico Fermi, care s-a născut în 1901 la Roma, constituie un exemplu rar de fizician, tot atît de excelent teoretician, ca şi experimentator. Una din contribuţiile sale importante în domeniul fizicii teoretice a fost studiul gazului electronic degenerat, care a avut consecinţe importante în teoria electronică a metalelor ca şi în înţelegerea stelelor supradense, cunoscute ca piticele albe. O altă lucrare importantă a fost formularea teoriei matematice a transmutaţiei particulelor, care includea emisia misterioaselor particule lipsite de sarcină şi lipsite de masă, propuse anterior de Pauli.

Fermi a fost un cetăţean al Romei, voinic, cu un puternic simţ al umorului. Pe cînd era încă profesor la Universitatea din Roma, Mussolini i-a acordat titlul de: „Eccellenza" (Excelenţă). S-a întîmplat odată ca Fermi să fie obligat să se ducă la o adunare a Academiei de Ştiinţe, la Palazzo di Venezia, care era puternic păzit, deoarece Mussolini în persoană urma să ia cuvîntul. Toţi ceilalţi membri au sosit în mari limuzine de marcă străină, conduse de şoferi în uniformă, în timp ce Fermi s-a apropiat în micul său Fiat. La poarta de intrare el a fost oprit de doi *carabinieri,* care şi-au încrucişat armele în faţa micului său automobil şi l-au întrebat ce caută acolo. în conformitate cu cele povestite de către dînsul autorului acestei cărţi, Fermi a ezitat să răspundă gardienilor: „Sînt Excelenţa sa Enrico Fermi", de frică că aceştia nu-1 vor crede. Atunci, pentru a evita încurcăturile, el a răspuns: „Sînt şoferul Excelenţei Sale, Signore Enrico Fermi". *„Ebbene",* au răspuns gardienii, „intră, parchează şi aşteaptă-ţi stăpînul".

Deşi ideea particulelor lipsite de sarcină şi lipsite de masă care însoţesc electronii emişi în transformările 0 a fost propusă iniţial de Pauli, Fermi a fost primul care a dezvoltat teoria

matematică riguroasă a dezintegrării 0, cuplată cu emisia particulelor răsfăţate ale lui Pauli, şi a arătat concordanţa ei deplină cu faptele observate. El, este, de asemenea, şi autorul numelui lor actual, *neutrino.* Pauli şi-a denumit protejatul ca fiind *neutron,* fapt care era în regulă, deoarece particula numită astăzi „neutron" (protonul fără sarcină), nu era încă descoperită . Cu toate acestea, numele nu căpătase „drept de autor rezervat", deoarece fusese utilizat numai in discuţii particulare şi in scrisori, dar niciodată in tipărituri. In 1932, cind James Chadwick a demonstrat existenţa unei particule neîncărcate, cu masă foarte apropiată cu cea a protonului, el a numit-o *neutron,* în articolul său pe care l-a publicat in *Proceedings of the Royal Society of London.* Cind Fermi, care mai era încă profesor la Roma, a comunicat descoperirea lui Chadwick, la seminarul săptăminal de fizică, cineva din auditoriu a întrebat dacă „neutronul lui Chadwick" este unul şi acelaşi cu „neutronul lui Pauli". *„Nu,* răspunse Fermi (care vorbea, natural, în italiană), *i neutroni di Chadwick sono grandi e pesanti. I neutroni di Pauli sono piccoli e leggieri; essi debbono essere chiamati neutrino*[111].

Aducînd această contribuţie filologică, Fermi a purces la dezvoltarea unei teorii matematice a transformării p, in care un electron (pozitiv sau negativ) şi un neutrino sînt emişi simultan de nucleele atomice instabile, împărţindu-şi statistic intre ele energia aflată la dispoziţie. El şi-a construit teoria pe linii similare cu teoria emisiei de lumină de către atomi, in cadrul căreia un electron excitat efectuează o tranziţie la o stare de energie mai joasă, in cadrul procesului, eliberind energia suplimentară în forma unei unice cuante de lumină. Mişcarea electronului înaintea tranziţiei discontinue este descrisă de o funcţie de undă care se extinde pe un domeniu comparativ larg. După tranziţie, funcţia de undă a electronului se reduce la o dimensiune mai mică, iar energia eliberată formează o undă electromagnetică divergentă, care

se propagă în întregul spaţiu înconjurător. Forţele care determinau această transformare erau forţele cunoscute care se exercită între cîmpul electromagnetic şi sarcina punctuală. Astfel că efectul lor putea fi uşor dedus pe baza teoriei existente. S-a constatat că probabilităţile deduse pentru tranziţiile electronice erau în concordanţă perfectă cu intensităţile liniilor spectrale observate.

în teoria dezintegrării p, Fermi a trebuit să facă faţă unei situaţii mult mai complicate. în cazul acesta, neutronul, care ocupă o anumită stare energetică în interi-

[1] In limba italiană, *neutrino* este diminutivul lui *neutrone-,* cu alte cuvinte, „micul neutron'*. Replica lui Fermi este: „Nu, neutronii lui Chadwick stnt mari şi grei, iar neutronii lui Pauli sînt mici şi uşori; ei trebuie numiţi neutrini'*. orul nucleului, se transformă într-un proton, modificîndu-şi în modul acesta sarcina electrică. De asemenea, în locul unei singure cuante de lumină, sînt emise simultan două particule (un electron şi un neutrino).

FORŢELE CARE DETERMINĂ TRANSFORMĂRILE p

Dificultatea majoră a constat însă în faptul că, spre deosebire de cazul emisiei de lumină în care forţele care determină procesul sînt forţele cunoscute electromagnetice, cele care determină transformarea (3 erau complet necunoscute şi Fermi a trebuit să facă o presupunere asupra ceea ce ar putea ele să fie. El a decis, ceea ce este caracteristic pentru un geniu, să facă presupunerea cea mai simplă posibilă şi anume că probabilitatea unei treceri a unui neutron într-un proton (sau invers) şi care dă drept rezultat formarea unui electron (negativ sau pozitiv) şi a unui neutrino[2] este simplu proporţională cu produsul intensităţilor celor patru funcţii de undă corespunzătoare in fiecare punct dat din interiorul nucleului. Coeficientul de proporţionalitate, pe care Fermi l-a notat cu litera *g,* urma să fie determinat prin

comparaţie cu datele experimentale. Folosind un aparat matematic suficient de complicat, Fermi a reuşit să deducă cum ar trebui să fie forma spectrului energetic (3 şi în ce mod ar trebui să depindă viteza dezintegrării p de cantitatea de energie implicată, în cazul în care ipoteza sa simplă asupra interacţiunii ar fi corectă. Rezultatul s-a dovedit in concordanţă strălucitoare cu curbele observate.

Singurul cusur al teoriei lui Fermi a dezintegrării (3 consta în aceea că valoarea numerică a constantei *g* (3 x 10“[14], în unităţi fără dimensiune[3]) nu putea fi dedusă din teorie şi trebuia să fie luată direct din observaţii. Valoarea extrem de mică a lui *g* explică faptul că, în timp ce emisia unei cuante *y* de către nucleu are loc o dată la IO[-11] secunde, emisia

[2] Nu vom introduce aici şi distincţia dintre un neutrino şi un antineutrino.

[8] Igl • yy==-j , unde *m* este masa electronului, *c* viteza luminii şi *h* constanta cuantică.

unei perechi electron-neutrino poate avea loc la intervale de ore, luni sau chiar ani. Datorită acestui fapt, toate transmutaţiile particulelor sînt cunoscute în fizica modernă ca *interacţiuni slabe.* Explicarea caracterului extrem de slab al acestor interacţiuni, care intervin în toate procesele în care are loc o emisie sau captură de neutrino, constituie o sarcină de viitor a fizicii.

FOLOSIREA LEGILOR CE INTERACŢIUNE ALE LUI FERMI

în mod analog cu procesul de dezintegrare‡‡‡‡‡‡‡‡

§§§§§§§§ ********* [3

si cu ‡‡‡‡‡‡‡‡‡ In conformitate cu consideraţiile energetice, primul proces are §§§§§§§§§loc atît în cazul neutronului liber, cît şi In cazul neutronilor legaţi **********în interiorul nucleului, în timp ce cel deal

există şi alte procese care urmează de asemenea legile de interacţiune ale lui Fermi. Unul din ele este captura unui electron atomic de către un nucleu instabil faţă de dezintegrarea p pozitivă. In loc de a emite un electron pozitiv şi un neutrino, un nucleu poate să capteze un electron negativ din propria sa pătură de electroni, emiţînd un neutrino în concordanţă cu formula:

$$_{x}\,(\text{nucl.})^{x} + \qquad z_i\,(\text{Nucl.})^{x} + v + \text{energie.}$$

Deoarece electronul atomic captat de către nucleu în cadru) unui astfel de proces este unul din electronii din pătura K (cea mai apropiată de nucleu), acesta este cunoscut în mod obişnuit sub numele de „captură K“. Cel mai simplu exemplu de un astfel de proces îl constituie izotopul instabil de beriliu, $Be^{\dagger\dagger\dagger\dagger\dagger\dagger\dagger\dagger\dagger}$, care poate să transmută fie după formula

$$_{4}Be^{7} \dashrightarrow {}_{a}Li^{7} + e^{+} + v + \text{energie}$$

---

doilea are loc numai
†††††††††în nucleele complexe, în care energia suplimentară necesară poate fi obţinută de la alţi nucleoni.

sau

$$_4Be^7 + (e)_{\text{pătll}}\text{ră} \qquad {}_aLi^7\ 4\text{- v} +$$

tn acest din urmă caz fotografiile de la camera cu ceaţă vor arăta numai o singură urmă (aceea a lui $_3Li^7$) şi situaţia este similară cu incidentul descris de H.G. Wells, în romanul lui binecunoscut *Omul invizibil,* în care un poliţist din Londra era lovit cu piciorul în spate şi, întrocîndu-se, nu vedea pe nimeni care ar fi putut să-i tragă un picior. Studiile experimentale asupra proceselor de captură K au arătat că frecvenţa acestora este în concordanţă exactă cu acea prezisă de teoria lui Fermi.

Un alt proces interesant care face parte din aceeaşi categorie e3te reacţia H-H (hidrogen-hidrogen), propusă pentru prima oară de Gharles Gritchfield, şi care constituie sursa ■energiei produse în Soarele nostru şi în alte stele epuizate®. In timpul scurtului interval de timp in care doi protoni în ■colizie sînt în contact strîns, unul din ei transmută într-un neutron, emiţind un electron pozitiv şi un neutrino, for- mlndu-se în felul acesta un nucleu de deuteriu (hidrogen greu)

în conformitate cu ecuaţia:

$$H^1 + H^1 \rightarrow H^2 + e^+ + \nu$$

Probabilitatea acestui proces poate fi prezisă exact pe baza (teoriei lui Fermi.

Ultimul,dar nu cel mai puţin important exemplu de interacţiune Fermi, este procesul cu ajutorul căruia F. Reines şi G. Cowan au dovedit în mod direct existenţa neutrinilor. Acesta este:

$$xP^l + \text{v 4-} \qquad n^1 + \overset{\bullet}{e}$$

Reines şi Gowan au observat această reacţie într-o cameră amplasată in apropierea unei „pile atomice" Ia instalaţiile de la Savannah River. Numărul neutronilor şi electronilor pozitivi observaţi, formaţi simultan în camera supusă unui bombardament extensiv de neutrini s-a arătat a fi exact egal cu cel prezis de teoria lui Fermi. Interacţiunea este atît de slabă, incit pentru a

absorbi o jumătate din neutrinii emişi ar fi necesar să se folosească un ecran de hidrogen lichid gros de cîţiva ani-luminăl Teoria lui Fermi a proceselor care implică neutrini se aplică de asemenea în multe cazuri de dezintegrare a particulelor elementare noi, descoperite în ultimii ani, şi astăzi se vorbeşte de „interacţiunea Fermi generalizată".

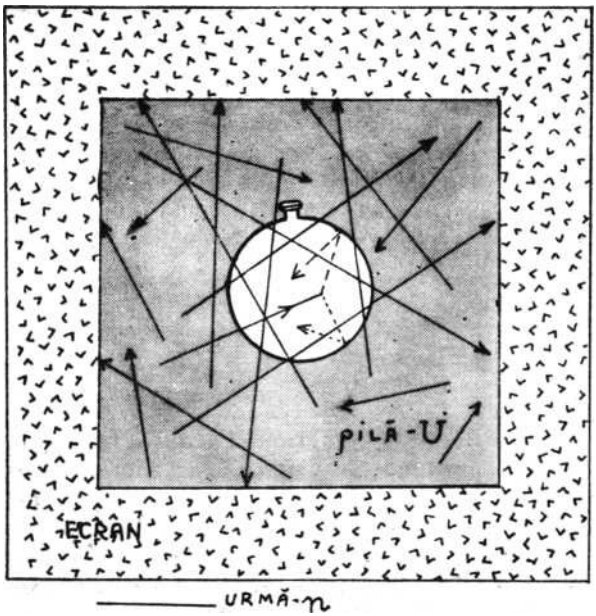
CERCETĂRILE LUI FERMI ÎN DOMENIUL REACŢIILOR NUCLEARE

In paralel cu studiile sale teoretice, Fermi a luat parte la vaste cercetări experimentale asupra reacţiilor nucleare din elementele grele bombardate cu neutroni lenţi şi în cele de sinteză a elementelor transuraniene *(z* >92), lucrări pentru care a căpătat Premiul Nobel pe 1938. îndată după asta,, s-a mutat în Statele Unite şi a participat, în 1939, la Conferinţa de la Universitatea George Washington, la care Niels Bohr a citit o telegramă de la Lise Meitner, cunoscuta fiziciană germană (care pe atunci trăia la Stockholm), telegramă care conţinea noutăţi senzaţionale. Ea îi comunica lui Bohr că foştii ei colaboratori, Otto Hahn şi Fritz Stras- sman, la Berlin, au stabilit că un nucleu de uraniu lovit de un neutron se sparge în două părţi aproximativ egale, eliberînd cantităţi mari de energie. Această comunicare a determinat declanşarea unei 6erii de evenimente care au culminat, nu cu mulţi ani mai tîrziu, cu bombe nucleare, uzine de putere nucleară etc. vestind începutul a ceea ce adesea este numit era atomică (nucleară ar fi mai corect),.

Fermi a preluat conducerea laboratorului arhisecret de la Universitatea din Chicago şi la 2 decembrie 1942 a anunţat că în după-amiaza respectivă a fost realizată prima reacţie în lanţ în uraniu, pornind astfel prima eliberare controlată de către om a energiei nucleare.

Deoarece această carte este consacrată progresului în înţelegerea naturii lucrurilor, nu

aplicaţiilor practice, noi vom evita orice discuţie asupra reacţiei de fisiune în lanţ şî



----------*URvH-p*
.....*unMA-e*

FIG. 29

Butelia lui Fermi amplasată în interiorul unei pile de uraniu cu scopul de a măsura viaţa medie a neutronului.

vom termina acest capitol cu descrierea unei experienţe interesante realizată de Fermi în reactorul de fisiune nou inventat. Pentru prima oară a devenit posibil să se măsoare timpul de viaţă mediu al unui neutron, care în ultimă instanţă se dezagregă într-un proton, un electron şi un neutrino. Dispozitivul folosit în această experienţă este cunoscut sub numele de „butelia lui Fermi", cu toate că de fapt era un conteiner sferic, oarecum asemănător unei sticle de Chian- ti, dar fără gît. După cum se arată în fig. 29, sfera a fost amplasată în interiorul unei pile atomice şi lăsată acolo o perioadă de timp considerabilă, în timp ce pila lucra. Neutronii de fisiune, în mari cantităţi, străbătînd în toate direcţiile pila, în cele mai multe

din cazuri intrau şi părăseau **„butelia lui Fermi“, trecînd fără dificultate prin pereţii acesteia. Din cind in cind insă, neutronul trecind prin „butelie" urma să se spargă intr-un potron şi un electron, pentru care pereţii „buteliei" erau impenetrabili. În felul acesta, in interiorul „buteliei" se acumula treptat gaz de hidrogen cu o viteză care depindea de şansa ca un neutron să se spargă in timp ce trecea prin aceasta. Măsurind cantitatea de hidrogen acumulată în „butelie", într-o perioadă de timp dată, se putea uşor estima timpul de viaţă mediu al neutronului, care s-a arătat a fi aproximativ de 14 minute.**

Pentru a cunoaşte mai mult despre activitatea lui Fermi pe liniile mai sus menţionate, cititorul poate să se adreseze cărţii *Atoms in the Family*[1]**, scrisă după moartea acestuia, de soţia sa, Laura.**

’ Atomii la noi acasă. — N.T.

H. YUKAVA ŞI MEZONII

Marele succes al teoriei lui Fermi a dezagregării [3 a ridicat problema dacă ea ar putea sau nu fi folosită pentru explicarea Torţelor de atracţie care menţin împreună nucleonii. La timpul respectiv se cunoştea că forţele dintre doi nucleoni — fie ei doi neutroni, un neutron şi un proton sau doi protoni — sînt identice, cu excepţia că în ultimul caz este nevoie să se adauge obişnuita respingere Goulomb dintre sarcinile protonilor. Experienţele au arătat că, spre deosebire de forţele coulombiene, care scad relativ lent cu distanţa (ca $1/r^2$), forţele nucleare sînt mai asemănătoare cu forţele de coeziune din fizica clasică. Exact în acelaşi mod în care două fîşii de bandă de lipit nu exercită nici o forţă una asupra celeilalte, indiferent cît de aproape s-ar afla una de alta, dar se lipesc puternic de îndată ce sînt puse în contact, forţele dintre nucleoni apar brusc cînd ei se „ating unul de altul", fapt care se întîmplă la o distanţă de circa 10^{-13} cm. De îndată ce acest lucru se întîmplă, este necesară o energie de circa zece milioane de electronivolţi pentru a-i separa din nou.

Forţe asemănătoare care acţionează între atomi sînt puse pe seama schimbului de electroni dintre păturile atomice, de îndată ce acestea intră în

contact. Teoria mecanică ondu- latorie a acestor „forţe de schimb" a fost dezvoltată în 1927 de W. Heitler şi F. London, care au arătat că problema poate fi rezolvată exact in cazul simplu a doi atomi de hidrogen care formează o moleculă biatomică[1]. Heitler şi London au luat în considerare două cazuri: (1) o moleculă de hidrogen ionizată, H_2^+, constind din doi protoni şi un electron; (2) o moleculă de hidrogen neutră, H_2, formată din doi protoni şi doi electroni (fig. 30a şi 30ă).

Pentru ambele cazuri a fost rezolvată complet ecuaţia de undă a lui Schrodinger pentru mişcarea electronilor. Rezultatul analitic a arătat că există o stare de echilibru de energie minimă pentru anumite distanţe R şi R^1 între cele două nuclee. Energia calculată din aceste stări de echilibru s-a dovedit a fi în concordanţă perfectă cu energiile de disociere, măsurate, ale moleculelor H_2^+ şi H_2. In felul acesta, noţiunea de forţă de schimb între doi atomi identici a fost stabilită cu fermitate în domeniul chimiei cuantice.

A fost cu totul natural să se presupună că forţele de atracţie dintre nucleoni ar putea să fie explicate pe o bază asemănătoare. Atunci cînd doi nucleoni sînt aduşi în strînsă apropiere, un electron acompaniat de un neutrino ar sări mereu de pe unul pe altul, producînd în felul acesta o forţă de schimb de atracţie. A fost o idee foarte bună, dar (vail) nu a corespuns. Cînd, în 1934, D. Ivanenko şi I. Tamm au calculat forţa de schimb dintre doi nucleoni care rezultă datorită interacţiunii Fermi, ei au constatat că energia de legătură aşteptată este de ordinul a 10^{-8} electronivolţi! Nu, aceasta nu este o greşeală de tipar; o sutime de milionime dintr-un electronvolt, în loc de zece milioane de electronivolţi; exact cu 15 ordine de mărime mai puţin! Evident, interacţiunea „slabă“ Fermi nu putea să fie cauza legăturii puternice a protonilor şi neutronilor din interiorul nucleului atomic.

Un an mai tîrziu (în 1935), un fizician japonez, Hideki Yukawa, a propus o idee revoluţionară pentru a explica interacţiunile tari dintre nucleoni. Dacă aceste interacţiuni nu pot fi explicate prin forţele de schimb ce iau naştere datorită trecerii încoace şi încolo a perechilor de electroni-neutrino, trebuie să existe o particulă complet nouă, pînă atunci nede>- tectată, particulă care trebuie să facă aceste treceri. Pentru a

O moleculă biatomică este molecula compusă din doi atomi.

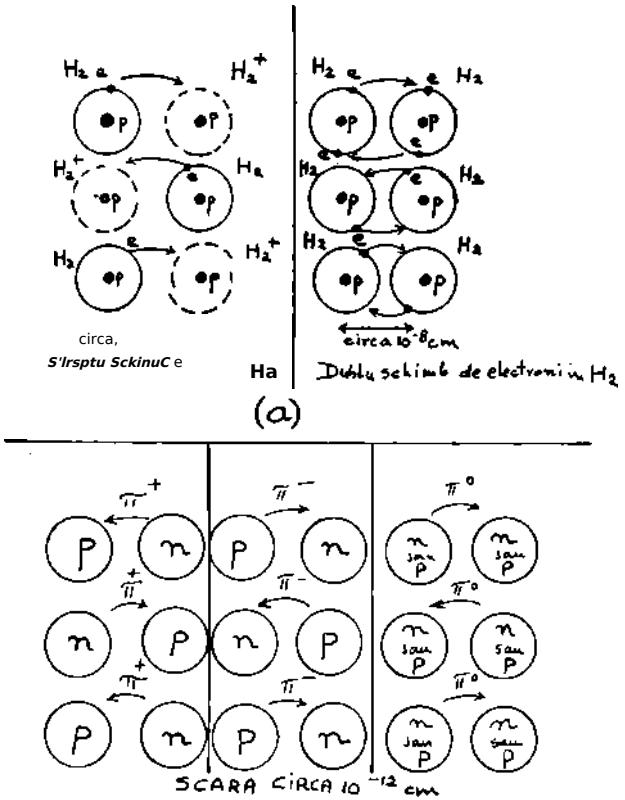


FIG. 30

Forţe de schimb, (a) Teoria lui Heitler şi London asupra forţelor care menţin împreună doi protoni In molecula de hidrogen ionizată şi fn cea neutrd. (b) *Trei posibilităţi diferite de explicare a forţelor nucleare prin schimbul* + — o de *pioni* (n, 7t, *ic).*

obţine puterea de legătură cerută de datele experimentale, a- ceastă particulă ar trebui să fie de circa două sute de ori mai grea decit un electron (sau de circa zece ori mai uşoară decît un proton). De asemenea, interacţiunea acesteia cu nucleonii,

caracterizată de constanta *y* de interacţiune a lui Yukawa, trebuie să fie de circa IO^{14} ori mai mare deeit constanta *g* de interacţiune Fermi, responsabilă pentru transformările £, în felul acesta ea fiind comparabilă cu interacţiunile obişnuite Coulomb dintre sarcinile electrice. Această particulă ipotetică a fost cunoscută sub multe nume: yukon, electron japonez, electron greu, mesotron şi, în fine, mezon. Doi ani după propunerea lui Yukawa, G. Anderson şi S. Neddermeyer, de la Institutul Tehnologic din California, au găsit în razele cosmice particule cu o masă de 207 ori mai mare decît acea a electronilor, şi ele păreau că dau o confirmare strălucită ipotezei lui Yukawa. A urmat însă un regres temporar. O serie de experienţe efectuate de M. Converi, E. Pan- ■cini, O. Piccioni au demonstrat fără nici un fel de posibilitate de dubiu că deşi noile particule au masa mezonilor ipotetici ai lui Yukawa, interacţiunea lor cu nucleonii este de 10^{12} ori mai mică decît ar fi fost necesar pentru explicarea forţelor nucleare. Deabia în anul 1944, fizicianul englez C. F. Powell, trimiţînd plăci fotografice în straturile superioare ale atmosferii, a arătat că mezonii observaţi la nivelul mării (cu masă de 207 ori masa electronilor) sînt produsele de dezintegrare a unor mezoni grei (cu masă de 264 ori masa electronului) formaţi de razele cosmice în straturile superioare ale atmosferei terestre.Există, prin urmare, două feluri de mezoni: grei şi uşori. Primii sînt cunoscuţi astăzi ca mezoni 71, sau simplu, pioni, în timp ce ceilalţi sînt cunoscuţi sub numele de mezoni p, sau pe scurt, miuoni. Pionii arată să aibă interacţiuni foarte puternice cu nucleonii şi e greu să avem vreun dubiu că *ei sînt* particulele considerate iniţial de către Yukawa ca fiind cauza forţelor nucleare.

Nu există însă pînă în prezent o teorie exactă a acestor procese (comparabilă, de exemplu, cu

teoria lui Dirac a antiparticulelor).

Cititorul a observat, desigur, că treptat, capitolele acestei cărţi devin din ce în ce mai scurte. Luciul acesta se datorează nu oboselii crescînde a autorului, ci mai curînd faptului că după strălucita evoluţie din primii săi treizeci de ani, Teoria Cuantică s-a împotmolit în mari dificultăţi şi progresul ei a fost puternic frînat. Ultimul „capitol ccmplet finisat[11] al acestei perioade a constat în unificarea de către Dirac a mecanicii ondulatorii cu teoria relativităţii restrînse, unificare care a avut ca rezultat eleganta teorie a antiparticulelor. După ce au fost descoperite şi experimental, antiparticulele au dovedit că se comportă exact aşa cum prevăzuse teoria.

LA LUCRU

Teoria lui Fermi cu privire la procesele care implică emisii şi absorbţii de perechi electron-neutrino devine însă destul de vagă dacă este aplicată unor procese mai complicate, cum ar fi, de exemplu, dezintegrarea unui miuon într-un electron şi *doi* neutrini. De asemenea, valoarea numerică a constantei Fermi, *g,* nu poate fi dedusă din valorile celorlalte constante universale. (In mod

asemănător, constanta lui Rydberg, 7?, din spectroscopia clasică, rămăsese o constantă empirică pînă ce Bohr nu şi-a publicat teoria asupra atomului de hidrogen.)

Dificultăţi similare se întîmplă şi în cadrul teoriei lui Yuka- wa a interacţiunilor tari dintre particulele elementare, valoarea numerică a constantei *y* nefiind nici pînă azi explicată. Cercetarea experimentală descoperă încontinuu o cantitate imensă de noi fapte şi se formulează numeroase reguli empirice cu ajutorul unor noţiuni introduse ad hoc, ca „paritate[11], „straneitate[11] etc. Luată în ansamblu, situaţia actuală seamănă, în multe privinţe, cu cea existentă în optică şi în chimie pe la sfîrşitul secolului trecut, cînd regularităţile din seriile spectrale şi din proprietăţile chimice ale elementelor erau bine cunoscute empiric, dar nu erau de loc explicate teoretic. Situaţia s-a îmbunătăţit brusc, cînd s-a elaborat teoria cuantică a structurii atomice, care a clarificat toate datele empirice adunate cu trudă. După părerea autorului, teoria particulelor elementare va putea ieşi din impasul in care se află în prezent — poate în anul viitor sau poate în anul 2000 — numai cu ajutorul unei idei noi, care se va deosebi de actualul mod de a gindi tot atit de mult pe cit acesta din urmă diferă de cel clasic. Nu dispunem de sfera magică de cristal cu ajutorul căreia am putea prevedea evoluţia ulterioară a fizicii teoretice, dar în locul ei, am putea apela la disciplina cunoscută sub numele de „analiză dimensională[11]. Oricine ştie că toate operaţiile de măsurare din fizică se bazează pe *trei mărimi fundamentale:*

Lungimea (stadii, mile, leghe, metri etc.)
Timpul (ani, zile, milisecunde etc.)
Masa (pietre, livre, drahme, grame etc.)

Toate mărimile fizicii pot fi exprimate prin acestea trei, cu ajutorul aşa-numitelor „formule

dimensionale[11]. De exemplu, *viteza (V)* este lungimea (sau distanţa) parcursă în unitatea de timp; *densitatea* (p) este masa unităţii de volum (volumul fiind lungimea la puterea a 3-a); *energia* (£) este masa înmulţită cu pătratul vitezei etc.Simbolic, se scrie:

$$|V| = \frac{|L|}{|T|}; \quad |\rho| = \frac{|M|}{|L|^3}; \quad |E| = |M| \cdot \left|\frac{L}{T}\right|^2$$

unde barele verticale arată că este vorba de o relaţie între naturile mărimilor fizice implicate şi nu de o relaţie numerică. Sistemul de unităţi de măsură nu contează şi se poate scrie:

| dolari | = | liră | = | marcă | = | franc | = | rublă | = | leu | = etc., sau

|yard| = | picior | = | metru | = | arşină | = | anlumină | = etc.

In fizica clasică, lungimea, timpul şi masa (sau, mai puţin corect, greutatea) au fost alese, pe temeiuri antropomorfice, adică pe baza unor noţiuni pe oare oamenii le lntilnesc în viaţa de toate zilele. („Este la 5 km de aici"; „Mă întorc peste o oră"; „Dă-mi trei kg de pulpă tocată[11].) Nu este însă necesar să se aleagă neapărat *aceste* trei mărimi, oricare *alte trei* mărimi puţind servi drept mărimi fundamentale, cu condiţia ca ele să fie independente una de alta, de exemplu, intensitatea curentului electric (amperul), puterea unui motor (calul putere) şi intensitatea luminoasă (luminarea standard). Totuşi,construind o teorie coherentă a tuturor fenomenelor fizice, este raţional să se aleagă cele trei mărimi fundamentale astfel ca fiecare din ele să domine cîte un sector vast al fizicii, iar celelalte mărimi să le exprimăm cu ajutorul lor. Care anume mărimi ar trebui să facă parte din acest trio?

Fără îndoială, una din ele ar trebui să fie viteza

luminii în vid‡‡‡‡‡‡‡‡‡ (c), care guvernează tot domeniul electrodinamicii şi al teoriei relativităţii. De fapt, dacă se presupune că lumina se propagă cu viteza infinită (c = oo), toată teoria lui Einstein se reduce la mecanica clasică a lui Isaac Newton.

Un alt membru al acestui Trio Universal este, desigur, cuanta de acţiune *(h),* care guvernează toate fenomenele atomice. Dacă se presupune $h = 0$, revenim la mecanica newtoniană. Marele merit al lui Dirac constă în faptul că a reuşit să unească relativitatea cu teoriile cuantice şi, în ecuaţiile sale, *c* şi *h* ocupă poziţii similare, de acelaşi rang.

Care este însă cea de a treia constantă universală necesară pentru a completa sistemul fizicii teoretice? Una din augustele candidate este, desigur, constanta gravitaţională a lui Newton. O examinare mai atentă însă, pare să indice că această constantă nu e prea potrivită pentru a colabora cu celelalte două la explicarea fenomenelor atomice şi nucleare. Forţele gravitaţionale sînt foarte importante în astronomie, ele explicînd mişcările planetelor, stelelor şi ale galaxiilor, în lumea noastră însă, a dimensiunilor umane, atracţia gravitaţională dintre corpurile materiale este neglijabil de mică şi ar fi foarte surprinzător ca două mere, aşezate pe o masă la cîţiva centimetri unul de altul, să se rostogolească unul spre celălalt, minate de atracţia newtoniană. Atracţia gravitaţională dintre două corpuri de mărime normală poate fi măsurată numai cu ajutorul unor instrumente extrem de sensibile.§§§§§§§§§§

---

‡‡‡‡‡‡‡‡‡ tncepind cu acest aliniat, se trece direct de la natura mărimii care urmează să fie aleasă, la natura şi unitatea de măsură a acesteia (respectiv de la *viteză,* la *viteza luminii)* . In limba engleză acest lucru se face pe nesimţite, ambele mărimi fiind exprimate prin acelaşi cuvînt — „unit**. Prin urmare, esenţială este alegerea anumitor trei mărimi fundamentale. — *N.T.*

§§§§§§§§§§ Vezi *Gravitaţia,* de G. GAMOW, publicată tn 1962 în aceeaşi colecţie. (In româneşte, în Ed. Ştiinţifică, 1966) — *N.T.*

In lumea atomică, forţele gravitaţionale sînt complet neînsemnate, ele fiind de circa IO^{60} ori mai mici ca cele electrice şi magnetice! Dirac a sugerat cîndva ideea că „constanta gravitaţională" a lui Newton nu este realmente o constantă, ci o variabilă care descreşte proporţional cu vîrsta Universului. Şi s-ar putea foarte bine să aibă dreptate.

Atunci? Care constantă universală va ocupa al treilea fotoliu? Am putea foarte bine proceda ca vechii filozofi greci, primii care au conceput ideea de atom: cea mai mică cantitate de materie. în cartea sa *Analiza Materiei*********** ††††††††††, Bertrand Russell scrie: „Am putea presupune, după cum a sugerat cîndva Henry Poincară şi după cum, probabil credea şi Pitagora, că spaţiul şi timpul sînt granulare, nu continue, ceea ce înseamnă că distanţa dintre două particule, ca şi timpul scurs între două evenimente sînt totdeauna multipli întregi ai unor cantităţi determinate. Continuitatea — în percepţie — a proceselor fizice nu constituie dovada unei continuităţi obiective".

In cartea sa *Principiile fizice ale teoriei cuantice,** Werner Heisenberg scria:

> „Deşi, în principiu, este posibil ca prin rafinarea aparatelor de măsură, să se micşoreze nelimitat intervalele de spaţiu şi timp, totuşi, pentru esenţa discuţiei despre conceptele teoriei ondulatorii este avantajos să se introducă valori finite pentru intervalele de spaţiu şi timp implicate în măsurări şi să se treacă la limita zero (A *x*->0; At-> 0) abia la sfirşitul calculelor. Probabil că evoluţia ulterioară a teoriei cuantice va arăta că limita zero pentru astfel de intervale este o abstracţie lipsită de sens fizic. Totuşi, pentru moment, se pare că nu există motive ca să se impună vreo limitare".

********** Editura Dover, New-York, 1954, p. 235.

†††††††††† University of Chicago Press, Chicago, 1930, p. 48.

Totuşi, după şase ani, Heisenberg şi-a schimbat părerea în ceea ce priveşte cele 14 cuvinte care urmează după „totuşi" din fraza citată mai sus şi a sugerat ideea că „divergenţele" care apar în diferitele cîmpuri din teoria cuantelor, ar putea fi eliminate prin introducerea unei lungimi elementare, de ordinul a IO^{-13} cm.

Ce înseamnă cuvîntul „divergenţă"? în matematică, acest termen se referă la „seriile infinite", adică la acele şiruri nesfîrşite de numere care se adună. De exemplu, putem scrie:

i l+2+3-|-4-|-5 (ş.a.m.d., pînă la infinit).
l

Evident, rezultatul însumării va fi infinit. Dar cum stau lucrurile cu seria: 14-1/2 4- 1/3 4- 1/4 4- 1/5 4- (ş.a.m.d., pînă la infinit)? Se poate arăta că însumarea duce la infinit sau, după cum spun matematicienii, seria este „divergentă". Pe de altă parte, seria:

1 4- 1/11 4- 1/2! 4- 1/31 4- 1/41 4-1/51 4- (ş.a.m.d., pînă la infinit). în care *n!* înseamnă produsul tuturor numerelor întregi de la 1 la n, este *convergentă* şi suma ei este 2,3026... în mod similar, seria:

1—-1/3! 4- 1/51 — 1/71 4- (ş.a.m.d. pînă la infinit) este convergentă şi are suma zero.

Rezultatele calculelor efectuate în fizica teoretică sînt şi ele deseori prezentate sub formă de serii infinite. Dacă seria este convergentă, aşa cum se întîmplă de regulă, atunci avem un răspuns clar şi o valoare bine definită pentru mărimea fizică calculată. Dar, dacă seria este divergentă, rezultatul devine lipsit de sens, deoarece conduce la o valoare infinită a mărimii calculate. Să considerăm problema masei electro-

nului, care a fost unul din primele exemple de astfel de divergenţe. Dacă ne reprezentăm electronul ca o

mică sferă de rază r_0, încărcată cu sarcina electrică e = 4,80 x 10^{-10} unităţi electrostatice, electrostatica clasică ne arată că energia cimpului electric înconjurător este----------. Conform legii lui Einstein a echivalenţei între masă şi energie, masa acestui cîmp este-----. Deoarece această masă nu trebuie să depăşească masa observată, m_0, a electronului (0,9xl0"^{27}g), rezultă

$$\frac{2}{2r_0c^9} \text{ sau } r_0 \qquad \frac{2}{2m_0c^9} = 2{,}82 \text{ X } IO^{-13} \text{ cm.}$$

Pe de altă parte, există motive teoretice temeinice să se presupună că electronul este o sarcină punctiformă. Dar dacă presupunem că electronul este o sarcină punctiformă (r_0 = 0) masa cîmpului electric înconjurător devine infinită! Contradicţii similare au apărut în număr mare, pe tot parcursul dezvoltării fizicii particulelor şi totdeauna se ajungea la rezultate divergente (infinite) dacă nu se „tăia" seria matematică infinită rezultată din calcul la un anumit termen al ei, deşi nu exista nici un temei care să justifice această operaţie. Pauli a numit în glumă acest procedeu — fizica retezării, („Die Abschneidungsphysik**).

Semnificativ era însă faptul că tăierea aceasta trebuia făcută totdeauna la distanţe de ordinul a 10"^{13} cm. Cînd, într-o epocă mai recentă, s-a putut măsura cu suficientă precizie raza de acţiune a forţelor care acţionează între nucleoni, s-a găsit că aceasta este 2,8xl0^{-13} cm, adică exact aşa-numita „rază clasică a electronului*[1], calculată pe baza ipotezei că masa electronului se datorează exclusiv cîmpului său electrostatic. Devine tot mai evident că există o limită inferioară a distanţelor, o lungime elementară X, anticipată de Pitagora, Henri Poincară, Bertrand Russell, Werner Heisenberg şi

alţii, lungime care este fundamentală în fizică. Aşa cum nici o viteză fizică nu poate depăşi viteza luminii, c, şi nici o acţiune mecanică nu poate fi mai mică decît acţiunea elementară *h,* tot aşa nici o distanţă nu poate fi mai mică decît X şi nici un interval de timp nu poate fi mai mic decît durata elementară, X/c. Cînd vom şti cum trebuie introduse X (şi X/c) în ecuaţiile fundamentale ale fizicii teoretice, vom putea afirma cu mîndrie: „Acum am înţeles, in fine, cum acţionează materia şi energia[11]1

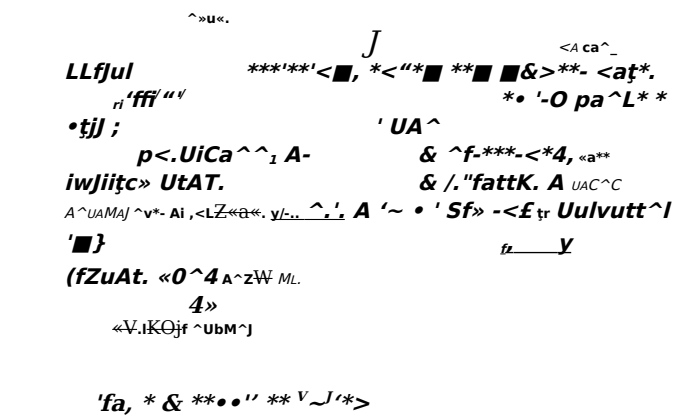
Dar, după cei 30 de ani „graşi[11] de la începutul secolului nostru, ne tîrîm acum prin ani slabi şi sterpi, cu speranţa că anii viitori vor fi mai norocoşi. In ciuda eforturilor veteranilor — Pauli, Heisenberg şi alţii — şi ale celor din generaţia mai tînără — Feynmann, Schwinger, Gell-Mann şi alţii — comparativ cu primele trei decenii, în ultimii 30 de ani fizica teoretică a progresat foarte puţin. Situaţia actuală cred că poate fi cel mai bine caracterizată prin cele spuse într-o scrisoare trimisă autorului acestei cărţi, de către Pauli, scrisoare în care acesta descria tentativa întreprinsă împreună cu Heisenberg de a explica masele diferitelor particule elementare, care, pe vremea aceea, se înmulţiseră ca iepurii. Iată un extras din această scrisoare, în care cea mai mare parte (nepublicată aici) se referă la problemele fundamentale ale biologiei: (fig. 31)

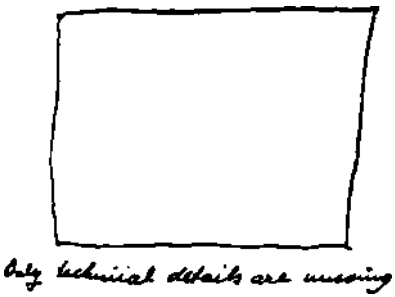
UNIVERSITATEA DIN CALIFORNIA

Departamentul de fizică
Berkeley 4, *California* *i* *martie* *1958*

Dragă Gamow,

Iţi mulţumesc pentru scrisoarea din 21 februarie. După părerea mea, treaba de care ne ocupăm, Heisenberg şi cu mine, este atît de complicată numai pentru că noi n-am înţeles-o suficient de bine. (Nu avem încă un „articol[11], dar un „preprint[11], încă nefinisat pentru publicare, va putea fi trimis în curind fizicienilor, pentru a le satisface curiozitatea şi pentru a preîntîmpina zvonurile senzaţionale.) In acest sens anexez comentariul meu asupra comunicării făcute de





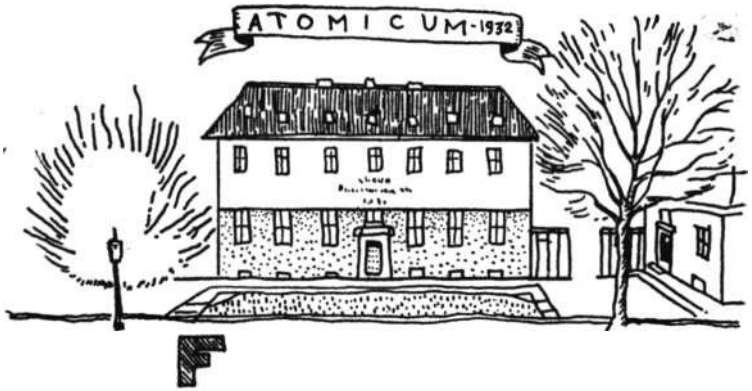
F/G. *31.*
Scrisoarea lui Pauli.

Heisenberg la radio. (Te rog să nu-1 publici in presă, arată-1 insă altor fizicieni şi popularizează-1 printre ei.) Comentariul asupra anunţului lui Heisenberg la radio: „Iată dovada că pot picta ca Tizian:

Lipsesc numai detaliile tehnice.“

V. Pauli

Au trecut 7 ani de cind a fost scrisă această scrisoare, s-au publicat sute de articole asupra problemei particulelor elementare şi totuşi ne aflăm încă in întuneric şi nesiguranţă. Să sperăm că intr-un deceniu sau două, sau măcar pină la începutul secolului al XXI-lea, actualii ani secetoşi ai fizicii teoretice se vor sfîrşi într-o jerbă de noi idei revoluţionare, similare cu cele care au anunţat triumfal începutul secolului al XX-lea.



O povestire

Scenariul după: J.W. von Goethe
Producător: Echipa de lucru a „Institutului de Fizică Teoretică"; Copenhaga

Motto: Nu ca să critic, ci... N. Bohr

PROLOG

ÎNTRE CER ŞI IAD

PREFAŢĂ. CÎTEVA REMARCI

Primele decenii ale secolului actual au fost martorele dezvoltării cu prioritate a teoriei cuantice a atomului şi în această epocă toate drumurile teoreticienilor, de toate naţionalităţile, au dus nu la Roma, ci la Copenhaga, oraşul în care s-a născut şi a lucrat Niels Bohr, primul care a elaborat un model corect al atomului. Devenise tradiţie ca la sfîrşitul fiecărei conferinţe de primăvară de la Blegdamsvej‡‡‡‡‡‡‡‡‡‡ 15 (adresa de pe atunci a Institutului de Fizică Teoretică al lui Bohr) să se facă un spectacol pe tema celor mai recente dezvoltări din fizică.

Conferinţa din 1932, care a coincis cu cea de a zecea aniversare a Institutului lui Bohr, a avut loc imediat după descoperirea de către fizicianul englez James Chadwick a unei particule noi, *avînd aceeaşi masă ca şi protonul, dar lipsită de sarcină electronică.* Chadwick a numit-o *neutron,* nume care a devenit azi familiar tuturor celor care se interesează de fizica nucleară, denumită îm mod curent oarecum incorect „energie atomică"

---

‡‡‡‡‡‡‡‡‡‡ Se pronunţă „Blii-dams-vii“.

în terminologie a avut insă loc o oarecare încurcătură. Cu puţini ani înainte, Wolfgang Pauli folosise acelaşi termen psntru a desemna o particulă ipotetică care *nu avea nici misă nici sarcină* şi care era necesară, după părerea sa, pentru a explica violarea legii de conservare a energiei, violareobservată experimental în procesul dezintegrării beta. ^Neutronul lui Pauli“ a format obiectul unor discuţii aprinse între fizicieni, acestea au fost însă în exclusivitate orale sau în corespondenţe particulare şi numele nu a fost niciodată ,,înregistrat" prin apariţia lui în vreo publicaţie oarecare. Şi astfel, in 1932, cînd Ghadwick a anunţat descoperirea sa, a unui neutron greu, într-un articol din „Nature", numele neutronului uşor al lui Pauli trebuia schimbat. Enrico Fermi a propus să fie numit *nsutrino,* care în limba italiană îndeamnă un neutron mic.

In traducerea care urmează, numele din textul original pentru particula lui Pauli „neuţron" a fost schimbat cu numele actual „neutrino", a cărui existenţă la vremea aceea nu fusese încă demonstrată. Mulţi fizicieni şi, în special Paul Ehrenfest, din Leida, erau foarte sceptici cu privire la neutrino-ul ipotetic al lui Pauli şi de-abia în 1955 existenţa acestuia a fost demonstrată în mod indubitabil prin experienţele lui Fred Reines şi Gloyd Cowan, ■de la Laboratorul Ştiinţific din Los Alamos.

Paginile care urmează sînt transcrierea unei piese care a fost scrisă şi realizată de cîţiva discipoli de-ai lui Bohr -■şi jucată la întîlnirea din primăvara anului 1932...

Tema acestei lucrări dramatice o constituie încercarea lui Pauli *(Mefisto)* de a vinde scepticului Ehrenfest *(Faust)* ideea neutrino-ului fără greutate *(Gretchen).* ţi '

Reproducem în această carte *Faust-u*| de la Blegdamsvej, în traducerea englezească a lui Barbara Gamow, ca pe un important document al acelor ani agitaţi de dezvoltare a fizicii. Autorii şi

actorii preferă să rămînă anonimi, cu «xcepţia lui J.W. von Goethe. Ţinînd seama că nu am reuşit să aflăm autorul sau autorii originali, precum şi scenografii originali, sugerăm editorului să retragă o parte corespunzătoare a drepturilor de autor, care urmează a fi plătite, şi să le ţină in custodie timp de doi sau trei ani, cu speranţa că publicarea cărţii va determina descoperirea autorului şi (sau) a scenografilor. Dacă aceasta nu se va întîmpla, suma ~ar putea fi remisă Bibliotecii Institut'-'ui, pentru cumpărarea de noi cărţi.

Exprimăm mulţumirile noastre Profesorului Max Del- briick pentru ajutorul dat la interpretarea uror pasaje ale piesei.

G.G.

în versiunea germană a acestui *Faust* fizic, rimele şi ritmul originalului lui Goethe au fost urmărite îndeaproape, dar nu întocmai (a se vedea pasajele corespunzătoare din *Faust).* Şi în versiunea aceasta, engleză, au fost admise o serie de licenţe poetice, astfel că ea se amplasează undeva între cele două. Din păcate, unele din versurile originalului care au fost utilizate ad litteram în textul versiunii germane a Faiwt-ului fizic nu au putut fi păstrate şi în versiunea engleză. De asemenea, a fost necesar să se încerce să se găsească pentru unele jocuri de cuvinte din germană, echivalente engleze. Unele din pasajele în proză în germană au fost traduse în engleză în versuri şi apar ca cuvîntări ale Maestrului de ceremonii. S-a făcut aceasta, în intenţia de a uşura reprezentarea pe scenă a acestui *Faust* fizic.

De-a lungul piesei are loc o amuzantă confuzie a identităţii personajelor: despre Greţchen se vorbeşte uneori ca despre Greţchen, alteori ca despre Neutrino; despre Faust. uneori ca despre Faust, alteori ca despre Ehrenfest. Aceasta nu face însă decît să mărească veselia şi nimeni nu se simte supărat.

în legătură cu aceasta, dacă piesa ar urma să fie jucată, cred că ar fi bine ca personajele minore (fie ele persoane sau concepte) să poarte tăbliţe distinctive, care să indice cine sînt: „Slater“, „Darwin“, „Monopolul*[4], „Semnul fals“ etc. în caz contrar ar rezulta pentru auditoriu o harababură de nedescurcat.

B.G.

PE CINE REPREZINTĂ PERSONAJELE

(Notă: Maestrul de ceremonii este jucat de Max Delbriick, fizician german)

Arhanghelul Eddington	A. Eddington, astronom
Arhanghelul Jeans	englez J. Jeans, astronom
Arhanghelul Milne	englez E.A. Milne, astronom
Mefisto	englez W. Pauli, fizician
Domnul	german Niels Bohr, fizician
Cetele cereşti Faust	danez „Ceilalţi"
Gretchen	P. Ehrenfest, fizician olandez
(Margareta) Oppie	Neutrino
Un om înalt[1]	R.Oppenheimer, fizician
Millikan-Ariel	american R.C. Tolman,
Landau (Dau)	fizician american R.A.
Gamow	Millikan, fizician american L.
Slater	Landau, fizician rus G.
Dirac	Gamow, fizician rus J.C.
Darwin	Slater, fizician american
Fowler	P.A.M. Dirac, fizician englez
Patru vrăjitoare	C. Darwin, fizician englez
	R.H. Fowler, fizician englez
	Invarianta de calibrare,

Constanta structurii fine, Energia negativă, Singularitatea

Profesorul Paul Ehrenfest explicînd un punct dificil auditoriului său (fotografiat probabil de dr. S. Goudsmit)

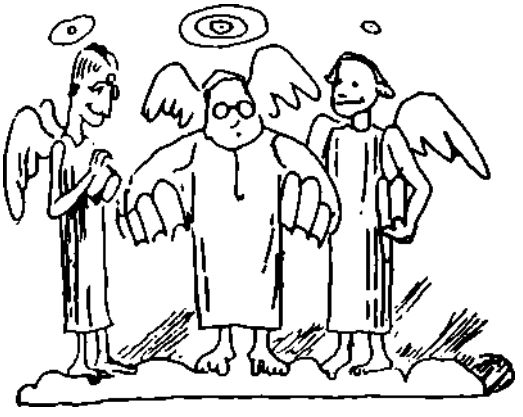
Kle.n, **Î ₇ ₄ i întli* Klein Bohr, Heisenberg, Pauli, Gamow, Lande la Copenhaga In 1930. în rîndul întli.**

Conferință tipică
dauj Kramers

Fotograful binevoitor Wagner
Corul mistic

Un fotograf binevoitor
J. Chadwick, fizician englez
Oricine ştie să cînte

CEI TREI ARHANGHELI, DOMNUL, CETELE CEREŞTI ŞI MEFISTO§§§§§§§§§§



ARHANGHELUL EDD1NGT0N : După cum bine ştiu, Soarelui îi este hărăzit să strălucească in sfere politropice[1]; drumul lui, de mult predestinat, *ale mele teorii* în întregime le confirmă. Slavă teoriei proclamată de Lemaître[2] (pe care nimeni din noi n-o înţelege)! Şi ca şi-n dimineaţa Creaţiei, lucrările strălucitoare sînt surprinzătoare şi grandioase.

ARHANGHELUL JEANS: Şi stelele duble, mereu rotindu-se şi-n deplasare rapidă, apar la iveală strălucind în zbor, alternînd străluciri de stele uriaşe cu noaptea eclipsei totale. Fluide ideale, fierbinţi şi rotindu-se, capătă prin fisiune formă de pară[3]. *Ale mele sînt teoriile* care cîştigă! Atomul nu poate să modifice regulile.

ARHANGHELUL MILNE: Furtunile se declanşează libere în competiţie (de altfel ca şi „Monthly Notices“[4]!) Şi ard, cu violentă ambiţie, importante noutăţi să prevadă. La o temperatură de 10 la

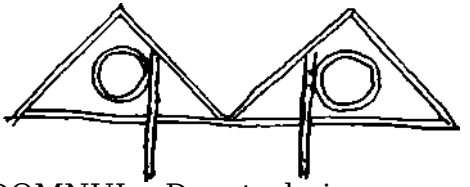
---

§§§§§§§§§§ Trimiterile din textul ce urmează, au explicaţiile la sfîrşit.— *N.B.*

puterea a 7-a gazul degenerează în flacără, permiţîndu-ne în numele lui Fermi[5] ora noastră strălucitoare de zbor maxim independent.

TOŢI TREI: Viziunea ne provoacă exaltare (deşi nimeni din noi n-o poate înţelege). Şi, ca şi-n ziua Publicării, Lucrările strălucitoare sînt surprinzătoare şi grandioase.

MEFISTO: (sărind în faţă) Deoarece, o *Doamne,* ai socotit că-i de cuviinţă să vii însuţi să ne vizitezi şi să ne-nveţi cum se comportă toate, şi deoarece se pare că-mi acorzi o oarecare preferinţă, ei bine, iată-mă aici (întorcîndu-se spre asistenţă) printre sclavi. Despre stele şi despre universuri nimic nu am a spune juriului; tot ce ştiu e cum se jăluie popoarele. După mine, teoria îi plină de vorbe (goale) şi de furii, deşi voi aici din nou sînteţi în extaz, fiind de acord cu puncte de vedere care se sparg ca baloanele de săpun şi băgîndu-vă nasul în tot felul de dificultăţi.



DOMNUL: Dar trebuie oare să întrerupi aceste sărbători tocmai pentru a te plînge, o tu Prinţ al Demonilor? Oare niciodată nu te-a pătruns cum trebuie Fizica Modernă?
MEFISTO: Nu, Doamne! Compătimesc Fizica pentru starea-i de plîns, şi în zilele-mi triste ăst fapt mă chinue şi mă mîhneşte adînc. Nu-i de mirare că mă jălui — dar cine oare îmi dă crezare?

DOMNUL: ÎJ cunoşti oare pe acest *Ehrenfest?...*
MEFISTO: Criticul[7]? (Apare o imaginea lui Ehrenfest.)

DOMNUL: Cavalerul meu.
MEFISTO: Cavalerul, scutierul şi vasalul vostru. Care vi-e rămăşagul? Vă previn, veţi pierde sigur, dacă-mi daţi posibilitatea să vă ispitesc cavalerul şi să-l duc departe pe drumul greşit.
DOMNUL: O, e într-adevăr îngrozitor! Da, trebuie să spun că da ... *Jah, muss ich sagen*[6] *...* Are loc un faliment fundamental al conceptelor clasice — o mlaştină. O remarcă particulară — dar ia-o confidenţial — ce ai de gînd să propui să facem cu *Masa?*
MEFISTO: Cu masa? Eh, să uităm de ea!
DOMNL[T]L: Dar ... Dar asta-i tare in-te-re-sant. Totuşi 6-0 încercăm ...
MEFISTO: O, pălăvrăgeală! Ce fel de prostii vorbiţi

azi! Fiţi calm.

DOMNUL: Dar ... dar ... dar ... dar ...
MEFISTO: E ipoteza mea!
DOMNUL: Dar bine *Pauli,* Pauli, noi practic stntem de acord. Nu-i nici o ne-nţelegere, pentru asta, garantezi *Natiirlich, Ich bin einig*[**********]. Putem desigur renunţa la Masă, la Sarcină, asta-i cu totul altceva —; aş, Sarcina *trebuie* să rămînăi
MEFISTO: Ce prostie temperamentală! De ce nu am scăpa de Sarcină?
DOMNUL: înţeleg pe deplin, dar *maa jegsp0rge,* prietene[9]. MEFISTO: Termină!
DOMNUL: Dar bine Pauli, ai să mă asculţi oare pînă la capăt? Dacă Masa şi Sarcina sînt trimise la plimbare, ce-ţi mai rămîne oare în general?
MEFISTO: Dragă omule, e doar elementar! Mă întrebi ce oare rămîne? De ce să mă jigneşti, *Neutrino-ul!* Deşteaptă-te şi foloseşte-ţi mintea!
(Pauză. Amîndoi păşesc încoace şi-ncolo).
DOMNUL: Nu spun asta ca să critic, ci mai degrabă pentru a învăţa[10]... Acum trebuie însă să te părăsesc. La revedere! Mă voi reîntoarce! (iese).

MEFISTO: Din cînd în cînd, eu pe Bătrînul bucuros îl văd. Şi-mi place să mă port cu el frumos — pe cît sînt eu în stare de frumos. E fermecător şi este falnic, o ruşine-ar fi să te porţi cu el nedrept — şi imaginaţi-vă 1 — vorbeşte întotdeauna atît de omeneşte cu Pauli. (Iese).

********** Joc de cuvinte: Desigur, sînt de acord şi: Desigur, sînt unic în felul meu! — *N- T.*

PARTEA ÎNTÎI

ODAIA DE STUDIU Â *LUI FAUST*

FAUST: Am învăţat — vai — Chimia Valenţelor, Teoria Grupurilor şi a Cîmpului Electric, precum şi Teoria Transformărilor aşa cum a fost ea revelată de Sophus Lie în una mie opt sute nouăzeci şi trei. Şi totuşi, cu toată ştiinţa mea, nu-s mai înţelept ca mai înainte. Magistru mi se spune şi-s Doctor. In sus şi în jos, împrejur şi deasupra, discipolii au fost ghidaţi de acest biet rătăcitor Faust, clown distrat; ei şi-au spart capul cu Fizica, precum mi s-a întîmplat şi mie. Şi totuşi, mă simt mai bine decît trăsniţii, Grangurii, maimuţele, „leprele". *Toate* dubiile şi scrupulele mă asaltează; şi de Pauli mă tem ca de Dracul însuşi. Apuc radiera ca un elev ieşit din minţi, înainte ca magicele X-erii[11] să dispară, fiindcă ceea ce este scris alb pe negru e apt pentru a fi acceptat şi ju6t. O, Doamne Sfintei Mai pot încă să-i învăţ cîte ceva. Nu-i am aici alături pe Guth sau pe Breit[12] dar pot folosi aptitudinea lor de predicatori pentru a răspîndi verificata evanghelie — *bine* şi-n *larg.* Nici măcar Hund sau un cîine n-ar putea să poarte sarcina"? mi[13]; eu sînt Criticul, trist şi neiubit. (Mefisto intră ca un trăsnet, îmbrăcat ca un negustor ambulant.)

Ce-i zgomotul acesta?

w

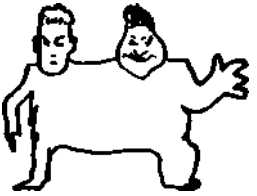
MEFISTO: La dispoziţia dumneavoastră, Domnule!
FAUST; Drept cine mă iei? Drept client?
MEFISTO: Te ştiam primitor şi civilizat ... Teoriile **acestea** sînt astăzi pline de greşeli. De aceea vreau **să-ţi prezint** ceva mai de calitate, cu care ai putea da foc la lume: **„Dan**sul Viţelului de Aur“ — caleidoscopic — pe nume *Teoria Radiaţiei.*

(Canon cîntat de toţi)

Born — Heisenberg Heisenberg — Pauli
Pauli — Jordan
Jordan — Wigner
Wigner — Weisskopf
Weisskopf — Born
Born — Heisenberg[14] (etc.)
(etc.)

MEFISTO: Ei sînt ai mei, ai mei, ca din osul meu. **Ascultă-i** cum cu vitejie şi cu gust, precoci, ei împart sfaturi. **Aici** liniile se lăţesc peste vasta întindere a cîmpului de **unde.** *(Maestrul de ceremonii* protestează prin gesturi. *Mefist»* repetă). Aici liniile

se lăţesc datorită lipsei de consistenţă a cîmpului de unde.
FAUST: Ajunge. Nu mă vei seduce. Sînt vindecat. Niciodată **nu mă** voi atinge de reprinturile tale, fii sigur.
MEFISTO: Sînt foarte bucuros (aparte):
Raţionamentul lui are măduvă. Primul om cu care am **ce** discutai (etalîndu-şi mărfurile) **O** Psi —Psi — *Stern?*[15] FAUST: Nu cumpăr !
MEFISTO: O Psi — Fsi — *Gerlach?*
FAUST: Nu cumpăr!
MEFISTO: Electrodinamică.
FAUST: Nu cumpăr!



MEFISTO: De *Heisenberg — Pauli*
FAUST: Nu cumpăr!
MEFISTO: Cu energie proprie infinită?
FAUST: Nu cumpăr!
MEFISTO: Electrodinamică?
FAUST: Nu cumpăr!
MEFISTO: De *Dirac?*
FAUST: Nu cumpăr!

MEFISTO: Cu energie proprie infinită? FAUST: Aceeaşi veche poveste!

MEFISTO: Trebuie Bă-ţi arăt atunci ceva ce-i unicat!

FAUST: N-ai să mă seduci, oricît de gingaş ai vorbi! Dacă vreodată spune-voi vreunei teorii; „Oh, cit eşti de frumoasă[11] şi; „Stai, o, nu pleca!“ putea-vei să mă pui atunci în lanţuri şi să-mi spui adio — fi-voi bucuros atunci să plec, tîrîn- du-mă, şi să mor.
MEFISTO: Păzeşte-te doar de Raţiune şi de Ştiinţă, aflate în alianţă ireverenţioasă şi care sînt ale omului cele mai mari forţe. Singur te-ai lăsat prins, uimit de puterea-i de vrăjitoare, de toate ispitele Cîmpului Cuantic. Ascultă! Deoarece acum obstacolele scad, vei face cunoştinţă cu frumoasa Neutrino, care ţi-e predestinată!
GRETCHEN: (intră şi cîntă către Faust. Melodia[1]; *Gretchen la roata de tors,* de Schubert).

Masa mi-e zero, şi sarcina-i la fel.
Tu-mi eşti alesul, numele-mi e *Neutrino.*
Eu îţi sînt predestinată, eu îţi sînt soluţia, închis este drumul dacă eu lipsesc.
Razele beta sînt totdeauna în compania mea[16]
Spinul N-ului[17] este de neînţeles dacă nu *sînt* şi eu acolo.

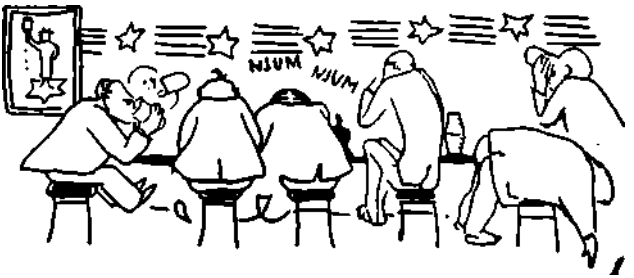
Masa mi-e zero şi sarcina-i Ia fel, tu eşti alesul meu, Numele-mi e Neutrino.
Spiritu-mi spre tine, iubite, se îndreaptă.
Biata-mi inimă după tine doar tînjeşte.
Sufletu-mi aprins de dragoste de tine trebuie cîştigat. Nu pot să-mi stăpînesc rotaţia (spinul) tremurătoare. Masa mi-e zero şi sarcina-i la fel, tu eşti alesul meu, Numele-mi e Neutrino.

(IeB cu toţii)

BARUL CLANDESTIN AL DOAMNEI ANN ARBOR[18]

(cunoscut sub numele de „Taverna lui Auerbach“)

(Fizicienii americani stau trişti la Bar).



MEFISTO: (apărînd din spatele barului) Nu rîde nimeni? Şi nimeni nu bea? *Eu am* să vă învăţ Fizică într-o clipită ...

(le face cu ochiul, exagerat şi semnificativ, fizicienilor). Ruşine să vă fie că de uimire staţi îngheţaţi, cînd de regulă sînteţi cu toţii plini de foc!

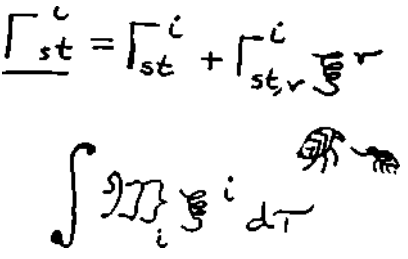
OPPIE: (înghiţind — Njum! Njum! — înainte de a vorbi). A ta e vina! N-ai adus un singur cuvînt măcar de-ncurajare — nici o noutate, nici o X-erie. Pfui!

MEFISTO: (prezentînd-o pe Greţchen) Uitaţi-vă la amin- doual (aplauze prietenoase şi tumult general).

UN OM ÎNALT: O signorina bine făcută şi atrăgătoare ... (către Mefisto) spune-mi, ai fost oare la Pasadena?
MEFISTO: Da, cu Einstein. Vă trimite salutări în refugiul vostru acest (vwnder-bar al Doamnei Annie Arbor.
UN OM ÎNALT: Einstein! Cu ale lui curbe! Cu ale lui cîm- puri! Cu întregul lui circ!
MEFISTO: (cîntă) Un *Monarh,* cu drag iubit, are drept fiu un Purice[19], mai mult sau mai puţin asemănător cu *Gra- vee-tdy-shee-un-ui.* Monarhul recurge la *Mayer*[iQ] şi Mayer spune: „Pentru a ne asigura, am să-i fac tensori[21], Sire, cu curbură de joncă". îmbrăcat ca un dandy, Puricele a fost

apoi prezentat. Oamenii îl mîncau ca zahărul candel, atît **de dulce** fu făcut. Puricele crescu şi ulterior i se născu şi
Fiul[22]**.** Şi fiul se luă la întrecere cu tatăl, dar niciodată nu

l-a ajuns. Pe jumătate goi, din bucuria şi mîndria Berlinu**lui, veneau** puricii, numiţi de necredincioşi „Teorii unifi-



cate ale cîmpului". Şi acum, fizicieni, fiţi prevăzători, **tăceţi** această lucidă verificare: cînd purici noi sînt nenăs- **cuţi,** asiguraţi-vă că sînt bine îmbrăcaţi.

TOŢI: Beţi aşa cum sîntem, ne simţim la fel de bine, ca — hicl —cinci sute de scroafe!
FAUST: (cunoscut ca fiind împotriva alcoolului, trece în faţă şi cinţă) (către Mefisto). Te aştepţi să mă fac sănătos în

acest haos, vacarm şi iad? (către Gretchen). Tu Schelet, tu Monstru, aicea sînt, îţi recunoşti tu însă domnul şi stăpî- nul? Ce mă reţine oare? Priveşte, te iau de mină, şi te sfă- rîm 1
GRETCHEN: Faust, Faust presimt o nenorocire 1

(Ies cu toţii).

PARTEA A DOUA

UN ŢINUT FERMECĂTOR

("Faust doarme, pe un pat de trandafiri. în dreapta lui un g>run. Un vacarm înspăimîntător anunţă apropierea lui *Millikan-Ariei).*

ĂIILLIKAN-AR1EL: (din înălţimi) Ascultă, o, ascultă cuvintele celor ce freacă (camere Wilson, contori)![23] Cu tunete, ,pentru a spiritului ureche, vor apărea acum *Razele Cosmice* / Protonii scîrţîie şi huruie, electronii se rostogolesc şi clin- cîie. Lumina dă năvală — încotro? de unde? *Heisenberg* e foarte supărat[24]; *Rossi* şi *Hoffmann* amîndoi sînt nervoşi[25] Toate aceste prostii n-au nici un sens!

Sil2*
FAUST: (trezindu-se)$_{t_1}$. O, cîmp parfumat de trandafiri, ce sol îmbrăţişez eu oare? Şi de ce-mi pare cunoscut? Se spune că Rosenfeld[26] binecuvîntează invariantul de calibrare[27]. Asta-i ghinda lui. (Apare Maestrul de Ceremonii) (către M.C.) Ce se va juca azi?
M.C.: Noaptea valpurgică, mai întîi *Poetic Clasică* şi după aceea *Teoretic Cuantică.*
FAUST: Excelent! Sînt de acord.

NOAPTEA VALPURGICĂ CLASICĂ
MAESTRUL DE CEREMONII (cu un gest de prezentare): Cea clasică — un potpuriu!

FAUST (se înclină înainte, în aşteptare. O lungă pauză arată că nu se întîmplă nimic): Dar nu se

întîmplă ni mica I

AI.C.: Aşteaptă, şi vei vedea!
FAUST (Aşteaptă. Iarăşi o lungă pauză şi iar nu se întîmplă nimic): Ascultă, Delbruck!...
M.C.: Faust, trebuia să te aştepţi că cea Clasică nu va avea nici un efect asupra auditoriului. (Intră *Dirac).*
DIRAC: Aşa-i! Aşa-i !
FAUST: De ce n-am sări peste asta, şi n-am trece la T. (eoria) C. (uantică)?
M.C.: De-aşi face astfel, aş greşi ca M(aestru) (de) C.(ere- monii), deoarece e necesar ca mai întîi cea Clasică să se termine cum se cuvine.
FAUST: Propun două scări diferite ale timpului pentru aceste Nopţi valpurgice. După cum am recunoscut, Prima trebuie dată uitării!
DIRAC: Nu-i permis!
FAUST: Propun atunci ca cea Clasică să fie deplasată cu mult înapoi în timp şi spaţiu.
M.C.: Se aprobă!

NOAPTEA VALPURGICĂ A TEORIEI CUANTICE

(De o parte a scenei, în fund, apar *Domnul* şi *Landau,* acesta din urmă legat şi cu căluş în gură).

DOMNUL: *Dau,* **fii liniştit!...** Da, într-adevăr, **singura-**teorie care e corectă, sau singura care m-ar putea seduce, este ...
LANDAU: Um! Um-uml Um-um! Um-uml
DOMNUL: Nu întrerupe discuţia! *Eu coi ţine* cuvîntarea, *Dau-,* vezi, singura regulă corectă empirică este! ...
LANDAU: Um 1 Um-um! Um-um 1 Um-um I (De partea cealaltă a scenei, în spate, apare după gratii faţa lui *Gamow}.*

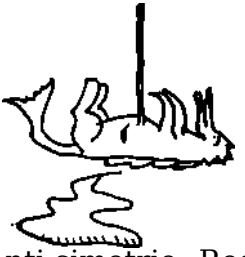
GAMOW: N-am putut veni **la Blegdamsvej (Barieră de** potenţial prea înaltă!) Această „discuţie" este o păcăleală, Domnul e cel ce-a făcut gluma. **Legat şi cu căluş, din cap** pînă-n picioare, Dau nu poate spune nici *„Niet!"* nici „Haraşo![11]" M.C. (în mijlocul scenei): Fii **atent 1** *Achtung!* Supraveghează! *Golurile* astea ale lui P. **Dirac[1]*, pot să vă** agaţe într-o secundă şi să vă întoarcă **pe dos! (El pune** un semn „Atenţie").

MONOPOLUL (păşeşte în faţă şi **cîntă): Doi Monopoli** se venerau reciproc[30] şi totul în ei **era iubire. Şi totuşi,** niciunul din ei nu se putea întîlni cu **fratele său. Dirac era** atît de

:inspăimîntător de sever! (către M.C.). Dar spune-mi — ■ (Atenţie! Uite un gol!) Unde-i oare iubitul meu *Antipol?*

M.C. (aparte): (Un Gol! Piciorul meu! Mai degrabă un crater!) (către *Monopol)* Aşteaptă o clipă — iată vine *Slater* (Slater intră cu o lance sîngerîndă şi cu *Dragonul Grupurilor*)[31].

M.C. (observînd personajele alergînd pe scenă): De ce aleargă? De ce se rostogolesc? Cine i-a rănit cu ţăruşul ăsta sîngeros? *Dragon al Grupurilor,* cu această lovitură mortală, te-am •doborît! îmbrăcat in solzi de indici este cel ce-a murit, de



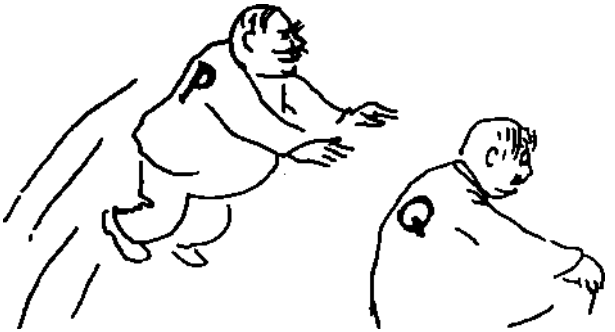
Anti-simetrie. Redus la nimic, el zace aici despuiat de rangul său şi de masca sa. *Dragon al Grupurilor* cu această lovitură mortală, te-am doborît!
{Semnul Fals intră).
SEMNUL FALS[32]: Toate teoriile pier sau provoacă dezamăgire. *Semnul* este cel ce vă strică toată plăcerea. Calculul este splendid, şi totul e frumos, şi totuşi, la zenit, îşi croieşte drumul Semnul!

(Dirac şi *Darwin* sînt aduşi în faţă)

M.C.: Uitaţi-vă, acesta-i veneratul *Caz Mono-dimensional-,* îl cheamă *Dirac* — îi recunoaşteţi figura. De aproape îl urmează *Tri-dimensionalul Darwin. (Semnul Fals* face pe grozavul în jurul lui *Dirac* şi-l împinge de-o parte. Nu se poate apropia însă de *Darwin).* Uitaţi-vă la Semnul Fals; este contrariat şi uimit. Este jignit în mîndria lui. El poate să-l manipuleze pe Dirac, Darxvin este însă o nucă prea tare pentru el, fiindcă Darwin este pînă acum ca o coţofană în cer — el e doar o slabă licărire în ochiul unui fizician. (M.C. ridică o pancartă, pe care o citeşte).

RELAŢIA DE SCHIMB[33]: *PQ-QP = hl2ni*

Supraveghiaţi-o! Darwin însuşi s-a transformat într-un *P, (Fowler* intră în scenă) iar Fowler — el e (>-ul —a sosit. După cum veţi vedea, ei explică *Relaţia* de pe pancartă jucînd capra ca nebunii prin toată curtea.



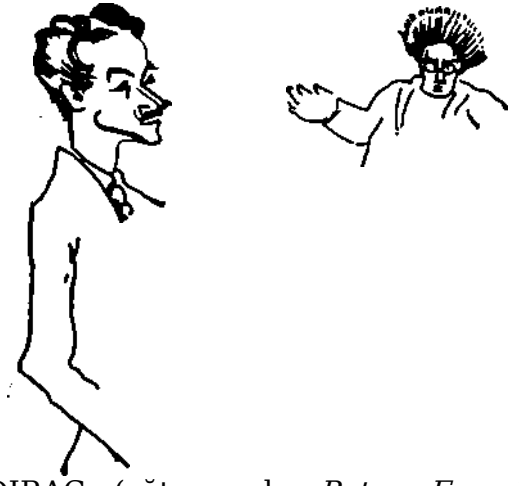
(La fiecare schimb străfulgeră (ca un flash!) semnul „A/2m“. între timp se cîntă): Astfel schimbate sînt *P* şi *Q,* o dată şi încă o dată. Şi peste toate planează *hfâni, hj2r.il* Ei nicio

dată nu pot să se astîmpăre, pînă ajung să dispară ca gîştele, pînă ajung să dispară ca gîştele. Şi peste toate planează A/2TU, Ă/2n 1 Atenţie! Atenţie! Acuma li s-a modificat forma

(P şi *Q* suferă acum dureroasa metamorfoză în *Electroni- măgari*[3]* şi cad în unul din Golurile lui Dirac). Iată *Elec- tronii-măgari.* Observaţi că s-au clătinat şi au căzut, datorită lipsei de grijă (stîngaci flăcăi!) într-unul din aceste Goluri puse aici drept capcane. *(Spinul Fotonului,* îmbrăcat in veşminte indiene, alunecă de-a lungul scenei, acompaniat de o muzică efemeră).

Din nou atenţiei Iată *Spinul Fotonului*[35] îmbrăcat cu un fel *de sari* indian şi pelerină. (E clar că nici un *Boson*[3]* modest şi respectabil nu va traversa podiumul fără a avea vreun veşmînt pe el!)
(Dirac trece în faţă, urmat de *Patru Femei Cărunte).* PRIMA: Numele mi-e Invarianta de Calibrare.

A DOUA: Sînt faimoasa *Constantă a Structurii fine*[37].
A TREIA: Eu sînt *Energia Negativă*[33].
A PATRA (către *A Treia):* Fii atentă la gramatică, Număr Trei! (către celelalte). O, suratelor, voi nu puteţi şi n-aveţi voie să intraţi în calcul. Dar, în cele din urmă, eu acolo voi fi, deoarece eu sînt *Singularitatea !*[39] *(Cele Patru* trec la marginea scenei, ca ulterior să se amestece din nou). FAUST: Patru am văzut venind, una am văzut ducindu-se; şi ce-au încercat să spună, nu ştiu. Aerul a devenit atît de plin de umbre şi stafii încît am face bine să ne spînzurăm de perucile noastre.
DIRAC: Se aude un croncănit de pasăre ciudată. Ce prevesteşte oare? Nenorocire! Teoriile noastre, gentlemeni, au intrat în amok. Trebuie să revenim la 1926[40]; tot ce-am făcut de atunci e bun doar de a fi ars.
FAUST: Şi oare nimica nu va fi generat astăzi?



DIRAC (către cele *Patru Femei Cărunte):* Tu singularitate, *dispari!*
A PATRA: Aici mi-e locul şi, te rog, *nu ţipa!*

DIRAC: O, leliţelor, am să vă elimin prin magia mea!
A PATRA: Nu sint eu oare in cimpuri Proprii? Radiaţia nu mă conţine oare? Forma mereu mi-o schimb, puterea însă mi-e aşa de mare, că nimeni nu mă poate înlănţui. Pe traiectorie, ca şi pe undă, prezentă sînt printre sclavii înspăimîntaţi, totdeauna găsită, deşi niciodată căutată, blestemată chiar înainte de a fi prinsă.
DIRAC: Nu văd unde vrei să ajungi! (Iese, alungat de *Singularitate).*
M.C.: (către spatele lui Dirac): Ai s-o afli curînd — femeia asta te va alunga pînă pe Lună! (către auditoriu) Numai dacă nu-1 vor salva picioarele lui lungi! Aveţi dreptul la trei încercări! Va evada oare?
(Apare *Mefisto.* Cineva bate la uşă. Un *fotograf binevoitor* aruncă o privire întrebătoare).

MEFISTO: Avansează, avansează! Intră, intră! Tu bădăran cu pantaloni lăbărţaţi, tu, cu placă şi film şi ţăcănit şi vacarm! (Arătîndu-1 pe *Faust).* El se zbîrceşte fără tine. FAUST (extrem de agitat, pozează pentru fotograful presei): în acest moment solemn lăsaţi-mă să spun: „Eşti atîta de frumoasă — O, rămîil", o urmă de-a mea va persista printre

cei Mari, în analele Celei de a Patra Stări. Anticipînd o soartă aşa de blîndă, mă bucur acvm de momentul care-mi aparţine!
(Moare, iar corpul lui este scos de PreBă).

MEFISTO: Nici o bucurie nu-i era suficientă; nici un noroc nu l-a liniştit. Formele schimbătoare, pe care le-a curtat, nu l-au plăcut niciodată. Sărmanul se agăţa de acelea care-1 evitau. Acum toate s-au terminat. Cum l-a ajutat Ştiinţa lui?]
M.C. (către aparatul fotografului): Afară, lumină dominantă! — dezvoltare de magneziu, revărsînd nori cu fulgere, eul deflorîndu-1, alterîndu-1 pe Unul, orbindu-1 pe Altul, nu ne mai deranja!

FINAL

APOTEOZA ADEVĂRATULUI NEUTRON

WAGNER[41] (apare, ca personificare a experimentatorului ideal, ţinînd în echilibru pe vîrful degetului o minge neagră, şi recită cu mîndrie):

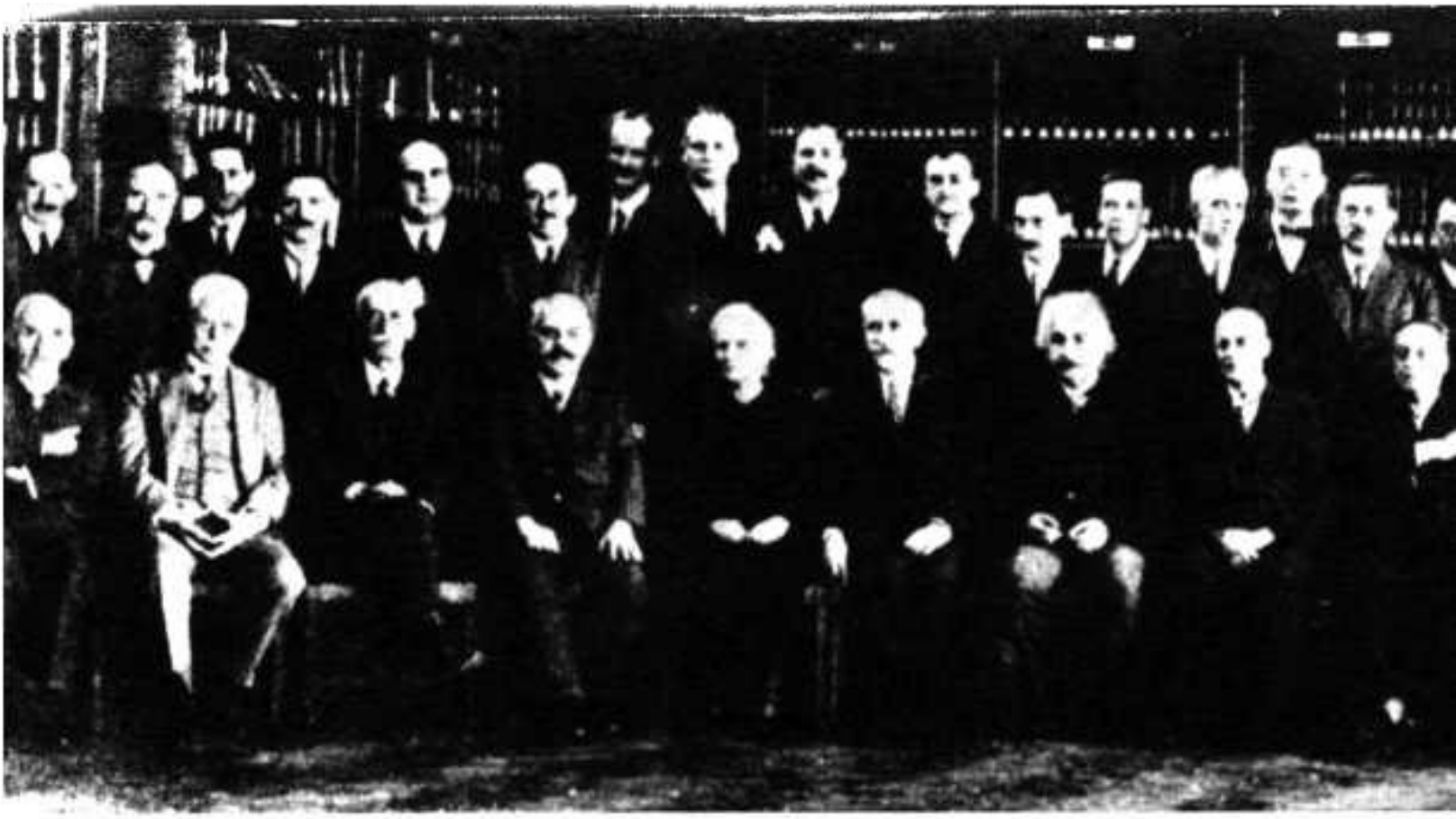
Neutronul a ajuns să existe, el este încărcat cu Masă.
Este totuşi lipsit de sarcină, Pauli, eşti de acord?

MEFISTO: Ceea ce experienţa a găsit — deşi teoria nu are nici o contribuţie — este întotdeauna recunoscut a fi mai mult decît valabil pentru a fi înfipt în mintea şi în inima noastră. Noroc, tu Ersatz de categorie grea, îţi urăm bun venit cu plăcere! Dar pasiunea toarce mereu intriga noastră, şi Gretchen este comoara mea!

•COR MISTIC: Azi o realitate, înainte doar o viziune. Ce clasicism, graţie şi precizie! Salutată cu cordialitate, onorată în imnuri, *Eternă Neutralitate,* ne trage înainte.

FINIS

Una din conferinţele de primăvară tipice de la Copenhaga (1932) la care a fost jucată piesa Faust (O parodie). în rîndul din faţă: N. Bohr, P.A.M. Dirac, VV. Heisenberg, P. Ehrenfest. M. Delbriick, Lisa Meitner ş multe alte creiere (ghiciţi-le) în rîndurile din spate. (Autorul acestei cărţi nu a participat la conferinţă.)



Institutul Internaţional de Fizică Solvay. Congresul al Vl-lea de fizică, octombrie 20—26, 1930.
Primul rînd: Th. De. Donder, P. Zeeman, P. Weiss, A. Sommerfeld, Doamna Curie, P. Langevin, A. Eins- tein, O. Richardson, B. Cabrera,
N. Bohr, W. J. De Haas. Rîndul doi: E. Herzen, E. Henriot, J. Verschaffelt, Manneback, A. Cotton, J. Errera,
O. Stern. A. Piccard, W. Gerlach, C. Darwin, P. A. M. Dirac, H. Bauer,
P. Kapiţa, L. Brillouin, H. A. Kramers, P. Debye, W. Pauli, J. Dorfman, J. H. Van Vleck, E. Fermi, W. Heisen- berg (Fotografiat de Benjamin Cou- prie)

Institutul Internaţional de Fizică Solvay, Congresul al Vll-lea de fizică, Bruxelles, octombrie 22—29,1933.

Primul rînd : E. Schrodinger, Doamna
I. Joliot, N. Bohr, A. Joffe, Doamna Curie, O. W. Richardson, P. Langevin, Lord Rutherford.Th. De Donder,
M. de Broglie, L. de Broglie, Domnişoara L. Meitner, J. Chadwick.
Rîndul doi: E. Henriot, F. Perain. F. Joliot, W. Heisenberg. H.A. Kramers, E. Stahel, E. Fermi, E.T.S. Wal- ton, P.A.M. Dirac. P. Debye.

N. F. Mott, B. Cabrera, G. Gamow. W. Bothe, P. Blackett, M.S. Rosen- blum, J. Errera, Ed. Bauer, W. Pauli,
J. E. Verschaffelt, M. Cosyns (în spate): E. Herzen, J.D. Cockroft, C D. Ellis,
Peierls,Aug. Piccard, E.O l.awren-

Prolog

1. **Sferele politropice sînt modelele matematice ale sferelor gazoase fierbinţi, care sînt stelele.**
2. **Abatele Georges Lemaître, un astronom belgian care a formulat Teoria Universului în Expansiune.**
3. **... cu forme de pară. Teoria lui Jeans asupra originii stelelor duble.**
4. **„Monthly Notices" ale Societăţii Regale Astronomice, în care se publică majoritatea articolelor engleze de astro- fizică teoretică.**
5. **Gazul electronic degenerat al lui Fermi constituie interiorul stelelor de o anumită clasă (vezi capitolul VII).**
6. **Un simbol care caracterizează relaţia de nedeterminare** *Aq-Ap* **din mecanica cuantică teoretică, semn ce va fi întîlnit ulterior în text.**
7. **Criticul. Profesorul Ehrenfest avea o atitudine critică faţă de multe idei teoretice, în particular faţă de ipoteza lui Pauli a neutrinoului.**
8. *Jah, muss Ichsagen* **... Limba curentă acceptată în Institutul lui Bohr era în mare măsură germana, datorită numeroşilor participanţi din**

Europa Centrală. Bohr o vorbea perfect, adesea însă cu danisme. Una din expresiile tipice era *„muss Ich săgeţi** **(„trebuie să spun“)**

care în germana corectă ar fi trebuit să fie *„darf left sagen“* („aş putea să spun“). Explicaţia constă in faptul că în daneză *„darf“* este care este mai aproape
de germanul *„muss“* sau de englezescul

9. *„maa jeg sparge^* înseamnă în daneză „aş putea să în- treb“.
10. „ ... nu ca să critic, ci“ una din expresiile tipice ale lui Bohr, pe care acesta o utiliza ori de cîte ori nu era de acord cu afirmaţia cuiva.

Partea intli

11. X-erie („Zxerei“, în germană) este un cuvînt inventat de Einstein şi care a fost utilizat adesea cu referire la articolele care conţineau prea multă matematică complicată („x“ reprezintă în algebra şcolară necunoscuta) şi puţin conţinut fizic.
12. E. Guth (semnifică ,,bine“) şi G. Breit (semnifică ,,larg“).
13. Fizicianul german F. Hund (înseamnă ,,cîine“) a cărui nume era adesea utilizat în expresia: „lucrînd ca un cîine“.
14. Fizicieni germani care lucrau în domeniul Teoriei cuantice a Radiaţiei.
15. Psi-Psi Stern (Psi-Psi stelat, este o mărime importantă în fizica cuantică. Aici, cu referire la Otto Stern şi W. Gerlach, experimentatori binecunoscuţi.
16. Raze beta. Conform ipotezei lui Pauli, neutrinoul este
I o particulă care însoţeşte întotdeauna emisia unei raze " 1 beta din nucleu.
17. Spinul N-ului. Potrivit concepţiilor timpului res-

pectiv, spinul nucleului (rotaţia axială) de nitrogen nu putea fi explicat fără luarea în considerare a spinului neutrino-ului ipotetic.

18. Referire la Universitatea din Michingan, la Ar.n Arbor, Michingan.
19. Puricele Monarhului (Einstein) este Teoria relativităţii generale.
20. WalterMayer — se pronunţă „Myer“ (rimează cu„Sir!“) care a lucrat ca asistent al lui Einstein la dezvoltarea teoriilor acestuia.

IM

21. Tensorii sînt simboluri matematice utilizate în teoria spaţiilor cu curbură.
22. Fiul este teoria unitară a cîmpului la care Einstein a lucrat, fără prea mult succes, ultimele trei decenii din viaţa sa.

Partea a doua

23. Camere Wilson etc. Aparate fizice folosite în studiul razelor cosmice.
24. W. Heisenberg (vezi capitolul VI) care în perioada respectivă lucra la Teoria razelor cosmice.
25. Bruno Rossi şi G. Hoffmann, experimentatori care studiau razele cosmice.
26. Leon Rosenfeld, un fizician teoretician belgian.
27. „Invariantul de calibrare", o noţiune complicată a fizicii teoretice. în germană „Eiche invariant[11]. Prin coincidenţă, cuvîntul german „Eiche[11] semnifică şi „stejar[11].
28. Landau. *Vezi Niels Bohr and the Development of Physics* (Niels Bohr şi dezvoltarea fizicii) de W. PAULI, New York, Mc.Graw-Hill Book Co., Inc., 1955, p. 70.
2r'. Golurile lui Dirac (pentru explicaţie, vezi capitolul VII).
30. Monopolul (pentru explicaţie, vezi capitolul VII).
31. Teoria grupurilor, o ramură complicată a matematicii, folosită în teoria cuantică.
32. Semnul Fals se referă la punerea unui + în locul unui — , sau invers, o greşeală comisă deseori din neatenţie în calculele matematice, şi care conduce desigur la rezultate false.
33. Relaţia de schimb. Postulatul de bază în mecanica cuantică a lui Heisenberg.
34. Electroni-măgari. Denumire glumeaţă a electronilor cu masă negativă (vezi capitolul VII).
35 Un foton, sau o cuantă de lumină, poate fi

considerat ca un pachet de energie în rotaţie.
36. Referitor la bosoni (vezi capitolul VI).
37. Constanta Structurii Fine. Numărul 137, important în teoria atomului.

38. Energie negativă. Una din dificultăţile matematice care apar în teoria cuantică.
39. Singularitate. Altă dificultate matematică care apare în teoria cuantică.
40. Mecanica ondulatorie a fost descoperită în anul 1926.

Final

41. Wagner. James Chadwick, fizicianul englez care a descoperit neutronul (o particulă neutră grea) în anul în care a fost jucată această piesă.
42. Ersatz. Neutronul, cu masa lui mare, nu poate fi considerat ca an substitut (,,Ersatz“) pentru neutrino, care este lipsit de masă.

INDICE

Numerele italice se referă la numerele figurilor din text

Academia Regală Daneză de Ştiinţă, 56
Adunare şi scădere, lege de, 99 de matrici, 100—103
Algebră necomutativă, 15, 101 — — 103
Alfa particule, 41—44, 74, 94—97 Condon şi Gtirney, 8 formula, Fowler, 133 mişcarea 95-96 aparatul lui Rutherford **10,** experienţa, 94 difuzia, 42, 133
Analiza materiei, Russell, 149 Anderson Cari, 145 experienţa lui, 128 Anti-particule, 16,82,115 —132, 145, 146 experienţa, 131 — 132 teoria, 16, 127 — 132, 146
Aristotel, 126
Aspecte matematice ale Fizicii, Bitter, 119
Atkinson Robert, 8, 97
Atomic, Nucleul, G. Gamow, 9
Atomice, modele, 13, 14, 72 Bohr, 12, 14, 48, 65, **12, 19** de Broglie, 90 Heisenberg, 99 Pauli, 72 Rutherford, 14, 41 — 44, 45 Schrodinger, 90, **21** Thomson, 39 — 44
Atomice, volume, 70 — 72 modificări ale, **15**
Atomii la noi acasă, L. Fermi, 148
Azimutal (e), 53, 72 linii nodale, 90, **21e** vibraţii, 90, **21d**

Balmer, J.J., 48, 49, **12**

formula lui, 48—51, 52—53, 9a
Barieră de potenţial, 94 — 97
Beta, difuzia, teoria, Fermi, 134 - 139,142,157
Beta, emisia, teoria, Fermi, 135
Beta, transformarea, teoria matematică, a, Fermi, 135-136
Bethe, H., 138
Bevatron, 129
Bitter Francis, 116, 119
Bjerknes, 62
Bohr, Harald, 62
Bohr, Niels, 1, 2, 11, 12, 13, 14, 15, 27, 28, 38 - 66, 69, 72, 74 — 78, 83, 84, 93, 111- 114, 115, 128, 139, **11, 18, 25** *Faust,* piesa, 59, 155, 157, 158, 160 - 196
Institutul, 12, 13, 56 — 66, 158 modelul atomic, 12, 13, 14, 48, 72, **12, 19**
teoriile lui, 28,92, 115, 146
Boltzmann, Ludwig, 17, 58, 77, 78
Boltzmann, constanta lui, 77, 78
Bondi, H., 121
Brackett, Frederick, **49, 12**
Bragg, W. şi Bragg W.L., 86
Broglie, Louis Victor de, **14,** 15, 83 - 97 modelul atomic, 90 undele pilot 14, 83 — 90, 95, 98, 111, **19, 20**
Browniane(ă) particule, 24
mişcare, 108

Carlsberg:
bursa, 56, 61 castelul, 56 — 57 fabrica de bere, 56 laboratorul de cercetări, 56 Cartesian, sistem de coordonate, 111
Casimir, H., 58, 59, 62
Catastrofa ultravioletă, 26, 28, 45 Ceaţă, camere de, 110, 138 Chadwick, James, 157 — 158, 161 - 196
descoperirea neutronului, 78
experienţele lui, 76, 135, **17** Cinetică, energie, 18, 19
Cinetică, teorie a căldurii, 17 „Clopoţei", metoda, 110
vezi şi Ceaţă, camere de,
Clausius, Rudolph, 27
Compton, Arthur, 13, 36
experienţele lui, 13, 36,
S, Compton, efectul, 36—37 Condon, E.U., 8, 60, 94
Ccnveri, M., experienţa lui 145 Cosmotron, 129
Coulomb, Charles de, 38, 44, 69, 94, 123, 127, 142,
Cowan, C., 79, 133, 158
Crimă ţi pedeapsă, 118
Critchfield, Charles, reacţia H —H, 138
Cuante de lumină, 13,17 — 36, 41

Darwin, C., 160 — 196
Davisson, G., 86 Delbruck, Max, 58, 61,160 — 196
Derivate:
de ordinul unu, 119 — 121
de ordinul doi, 119 — 121 Diagrame:
Bohr — Coster, **18a**
Mayer — Jensen, **18b**
Dimensională:
analiza, 147 — 149
formula, 147 — 149
Dirac, P.A.M., 15, 58, 74, 82,
115 - 132, 141, 148, 149,
160 - 196, **28** experienţe, 128 ecuaţia liniară, 121 — 123 teoria anti-particulelor 128 — -1
unificarea teoriilor relativităţii şi cuantice, 148
unificarea mecanicii ondulatorii şi a relativităţii speciale, 146
„Divergenţe", 150 — 151
Dostoievski, 118

Eddington, A., 162
Ehrenfest, PauJ, 59, 78, 158, 160 - 196
mecanica statistică, 59
teoria invarianţilor adiabatici, 59
Einstein, Albert, 11,13, 28, 31,34, 36, 44, 45, 55, 57, 105 - 107, 120 - 125, 133,148 şi Bohr, discuţia, 111 — 114,25
Teoria relativităţii generale, 44, 126 efectul fotoelectric, 31 — 36
două legi ale, 33 — 34
formula 34
Legea conservării masei şi energiei, 76, 78, 123, 129, 151, 158
mecanica relativistă, 122
teoria relativităţii 28, 45, 104 Electrodinamică, 63, 148 Electromagnetică, teoria emisiei, clasică, 44 Electromagnetică, energie cuantificată, 45
Electromagnetice, unde, 20, 33, 83, 92, 108, 111, 119, 136 energie a, 28
scurte, 20 oscilaţii, 20
Electronii, nivele, cote pentru,
69 - 72, 15
Electronul cu spin, 115 — 116,
121 - 123, 125
vezi şi spinul electronului
Energie, pachete de,
vezi cuante de lumină
Energie radiantă, 13, 23, 25 - 26, 28, 107, 112 - 114
Echipartiţie, legea de, 18, 19,
20, 21 — 23, 26, 29, **4**
Euclid, 105, 108
Excludere, principiul de vezi
Pauli, principiul lui
Experienţa:
Anderson, 128
Chadwick, 76
Compton, 13, 36

Ccnveri, 145
Cowan, 138, 158
Davisson, 86
Dirac, 128
Fermi, 64 — 65, 139
Fermi, butelia lui,139—141,29
Frisch, 65
Germer, 86
Hahn, 64 — 65
Heisenberg, 105 — 108, **24**
Helmholtz, von, 91 —92
Michelson, 104
Pancini, 152
pianului, comparaţie cu, 25, **4**
Piccioni, 152
Planck, 34
Reines, 138, 158
Rutherford, 43, **10**
Stern, 86 — 87
strunei, 21, 3
Thomson, G., 86
Thomson, J.J., 38 — 41
Tuve laboratorul, 65
Experiment mental, Gedanken- experiment, 23

Faust, 59, 160 — 196
Fermi, E., 133 — 141, 145,158
Atomii la noi acasă, 148
constanta g, 136, 143, 146 experienţe, energie nucleară, 64 -65,139
gaz electronic degenerat, studiul, 134
interacţiuni slabe, 145
teoria transformării particulelor, formularea 133 — - 139
Fermi, butelia lui, experienţa, 139 — 141, **29**
Feymman, Richard, 152
Fină, structură, constantă 55,160 Fisiune, reactor de, 140
Fizică nucleară, Pauli, 74 — 78 Formula, Rutherford a difuziei particulelor alfa 133
Fotoelectric, efect, 31—36 experienţe, 6, 31 legile, 33, 7
Einstein, 34
Fowler, R.H., 89, 133,160 — 196 Franck, J., 68 — 69
Frisch, Otto, 65

Gamow, Barbara, 158
Gamow, George, 26, 58 — 63, 64, 79, 88 - 89, 94, 158, 160 - 196 *Gravitatea* 119, 149
lista de titluri de cărţi, 9, 10 premiul Kalinga, 10
scrisoarea lui Pauli către, 152, **81**
Geissler, Heinrich, 46
Geissler, tuburi, 46
Gell-Mann, 152
Germer, L.H., 86
Gibbs, Iosiah Willard, 17
Gordon, W., ecuaţia de undă, 121 Goudsmit, Samuel, 73, 116 Gravitatea universală, teoria, 133
Gurney, R.W., 8, 60, 94

Halin, Otto, 65, 139

experienţa lui, 64 — 65
Hamilton, principiul acţiunii minime, 30
Heisenberg, Werner, 15, 58, 98 — 114, 149, 150, 151, 81 algebră necomutativă, 15 experimentul lui, 105 — 108, **24** mecanică matricială, 98 — 104 microscop cuantic, **24** model atomic, 98 *Principiile Fizice ale Teoriei Cuantice,* 149 principiul de nedeterminare> 98 — 114 formularea, 63
Heitler, W., 143,30
Helium, atomi de, 41 — 42, 74
Helmholtz, Hermani von, 27, 91, 92 experienţa 'ui, 91 —92
H — H, reacţia, 138
Houtermans, Fritz, 8, 97
Hidrofluoric, acid, 23
Hidrogen, 14, 18 — 19, 23, 72, 138, 141, 143, 30
Hidrogen, atomul de, 47 — 50, 55, 69, 92, 138, 143, **12** ecuaţia liniară a lui Dirac, 121 — 123 orbitele, 38 — 66, 115, **13** teoria lui Bohr, 145
Hyperoni, 131
Interacţiuni, legi de, Fermi, 137—139, 144, 145 constanta de, Fermi, 138, 145, 146 constanta de, Yukawa, 145 generală, Fermi 139
Interacţiuni slabe, 137, 143 Ivanenko, D., 143

Jaffe, B ., *Michelson* şi *viteza luminii,* 45
Jeans, Sir James, 19, 20, 24, 28, 162 formula lui, 20, 30 şi analogia pianului, 25, *4*
Jeans, cubul lui, 23, 25, 26, 28, 112
Jensen, Hans, 80, 81, 93, **18b**

Kant, Immanuel, 104
Kapitza, Piotr, 118
K-captură, procesul de, 137—139
Kepler, legea a doua, 55
Kirchhoff, Gustav, 27
Klein, O., 58, 62 formula, 121 ecuaţia de undă, 121
Kramers, H.A., 58

fandau, L. 58, 160—196
Lanţ, reacţie în, prima 139
Linderstrom, Lang, 56
Linii matematice lăţite, 111 London, F., teoria forţelor de schimb, 143, 30 Lucru de ieşire, 34
Lyman, Theodore, 49, **12**

Magellan, 104
Magice, numere, 80—82
Magneţii, Bitter, 116
Matrici, 99—104
Masă negativă, 123—126, 128-131, **26, 27b**
Maupertuis, P.L.M., 52

Maxwell, James C., 17, 18, 77 curbele lui, 18, 1
Mayer, M. Goeppert, 80, 81, 93, **18b**
Mecanică clasică, vezi Newton, mecanică clasică
Mecanică ondulatorie, 8, 15, 60, 63, 92-97, 98-99, 104, **23** ecuaţia, 15, 104, 119—121
Mecanică statistică, legea de bază a, 18, 19, 58
Meitner, Lise, 65, 139
Mendeleev, D.I., 72
Mendeleev, sistemul periodic al lui, 79
Mesoni, 131, 142, 144—145 Michelson, A.A., 45 experienţa lui, 104
Michelson şi viteza luminii, 45 Jaffe, 45
Millikan, Robert A., 31,160—196 Milne, E.A., 162
Minkowski, H., 120
Miuoni, 145, 146, 147
Mott, N.F., 58

Neddermeyer, S., 145
Neutrino, 78—82, 134—139, 143, 146, 158, 160-196 anti-, 136
Newton, Sir Isaac, 28, 44, 99 constanta gravităţii, 44, 148-149 legea gravitaţiei universale,26. 44, 133 legea mişcării, 120 ecuaţia, 120 mecanica clasică, 18, 19, 38, 39, 95, 96, 97, 98-104, 109, 111, 119, 120, 148, **23** ecuaţiile, 51, 103, 119 newtonian, conceptul de spaţiu şi timp, 11
Nishina, Y., 58, 117—118 formula lui, 118
Nobel, premiul, Dirac, 116 Fermi, 139 Planck, 28
Nudei atomici, teoria, Rutherford, 41—44
Număr cuantic principal, 55

Oppenheimer, J. Robert, 58, 160-196
Orbite, 38—66, 115 circulare, 44, 50, 51, 52, 53, 54, 92-93, **13** ale electronilor, 83—84, 110 diptice, 44, 53-56, 92-93, **13** energia, 54 cuantice, 15, 38—66, 69, 72, 74, 83-85, 94, 110, **13, 19**
Originea elementelor chimice, Gamow, 9

Pancini, E., experienţa lui, 152 Particule: traiectoria, 110 transformări, 133—141 vezi şi anti-particule
Paschen, Friederich, 49, 12 Pauli, Wolfgang, 58, 59,

67—82, 151-152, 153, 157, 160-196 efectul, 68, 133
modelul atomic, 72
neutrino, 73—74, 158
principiul lui, 68—82, 125, **15, 16a**
modificat, 74, **16b, 16c** al doilea, 128
scrisoarea către Gamow,31,152
Teoria Relativităţii 68
loc vacant, 126
Peşte de adine, 126
Pianul, 39
şi cubul lui Jeans, 24—25, **4** Piccioni, O., experienţa lui, 152 Pioni, 145, 80
Planck, Max, 7, 8, 11, 13, 15, 16, 17-37, 41, 45
Autobiografie ştiinţifică, 27 constanta *h,* 30, 85, 136, 148 curbe teoretice 30
Legea a doua a termodinamicii, 27
legea cuantelor de lumină, 28 formula lui, 30
fotoelectric efectul, 31—36
Noţiunea de Cauzalitate in Fizică, 27
Premiul Nobel, 28
teoria cuantică, 28—29, **5** teoria radiaţiei — termodinamică, 27
Planckiana, asteroid, 28
Planck, constanta lui, sau *constanta cuantică,* 30
Poincare, Henri, 149, 151
Powell, C.F., 145
Prima şi a doua lege a mişcării, Newton, 120
Principiul de nedeterminare, Heisenberg, 98—114
Principiile fizice ale teoriei cuantice, Heisenberg, 149
Principiile matematice ale filozofiei naturale, Newton, 99
Principiul minimei acţiuni, Maupertuis, 52
Pytagora, 149, 151

Radiaţie, 19, 20, 31, 76, 112 cuantă, frecvenţă, 20, 21, 22 infraroşie, 20 presiunea, efect al, 107 termică, 20 ultravioletă, 20
Rayleigh, Lord, 19, 20, 28 formula lui, 20, 30
Reacţii termonucleare, 97
Reines, Fred, 79, 138, 158
Relativitatea generală, teoria, 11 Relativitatea specială, teoria, 11
Relativitatea şi *Bunul Simţ,* Bondi, 121 Ritz, W., 47
Rosenfeld, L., 58, 63
Rosseland, S., 58, 62
Russell, Bertrand, 151
Analiza Materiei, 149
Rutherford, Lord Ernest, 14, 41, 42, 43, 44, 74, 88
aparatul, **10**
modelul atomic, 14, 41—44 particulele alfa, 41—

44 experienţa, 10, 42, 95
formula difuzie', 133
primele studii ale reacţiilor nucleare, 63—64
teoria nucleului atomic, 41—44 Rydberg, constanta R., 48, 146 Rydberg, regula lui, **11**

Savannacli River, Proiectul Comisiei pentru Energia Atomică, 79
Schrodinger, Erwin, 15, 97, 98, 111
ecuaţiile, 89—92, 103, 115, 119, 120, 143, **22**
mecanica ondulatorie nerela- tivistă, 15, 120
ecuaţia, 121
mecanica ondulatorie, teoria,15 articolul despre, 98, 103 modelul atomic, 90
Schwinger, Julian, 152
Segre, Emilio, 130
Slater, J.C., 58, 160-196
Snell, legea lui, 95, **23**
Solberg, 62
Sommerfeld, Arnold, 27
formula, 53—54
orbitele eliptice, 53—56
Spectru, spectre, 15, 38—40,45,
55, 133
energia particulelor beta, 76,
13 **17**
heliu, **9**
hidrogen, 9, 48
linii spectrale, 14, 15, 39,
47-49, 55, 73, 98, 103, 121 raze beta, 41, 78
Spin, vezi electronul cu spin,
Stern, Otto, experienţa lui, $6 — 87
Strassman, Fritz, 139
Studii asupra gazului electronic degenerat, Fermi, 133

Tamm, I., 143
Teller, Edward, 65
Teodolit, 105-107
Teoria Relativităţii, Einstein,ll,
19, 45, 76, 105, 115, 116, 119, 120, 123, 148
Teoria Relativităţii, Pauli, 68
Termică, mişcare, 17
Termodinamică 28—29
Thomson, Sir George, 86
Thomson, J.J., 38—41, 66
modelul atomic, 38, 39, 42—43 experienţele, 38—41
Tolman, R.C., 58, 160—196
Traiectorie, 52, 53, 104—108 experienţă, 104—106, **24** liniară, 104, 111
Transformarea particulelor, teoria, Fermi, 133—141
Tuve, Merle, experienţa, 64—65

Uhlenbeck, George, 73, 116

Unificarea teoriei
relativităţii cu teoria
cuantică, 15, 115, 119-
127
Uraniu, 95
izotopii, 81
modelul atomic, 79
nucleul, 97 prima reacţie
In lanţ, 139

Weizsăcker, Cari von, 58,
138
Wells, H.G., *Omul invizibil,*
138

Yukawa, Hideki, 142—145
constanta y, 143—145
mesonii, 142—144 teoria
interacţiunilor tari, 145

Zeeman, efectul, 73

CUPRINSUL

Notă biografică 7
Prefaţă 11
Introducere 13
Cap. 1. M. PLANCK ŞI CUANTELE DE LUMINĂ... 17
Mecanica statistică şi radiaţia termică. Max Planck şi cuanta de energie. Cuantele de lumină şi efectul fotoelectric. Efectul Compton.
(Jap. 2. N. BOHR ŞI ORBITELE CUANTIFICATE..... 38
Teoria lui Rutherford asupra nucleului atomic. Cuantificarea unui sistem mecanic. Orbitele eliptice ale lui Sommerfeld. Institutul lui Bohr
Cap. 3. W. PAULI ŞI PRINCIPIUL DE EXCLUDERE ....
67
Cote pentru nivelele electronilor. Electronul cu spin. Pauli şi fizica nucleară. Neutrino-ul.
Cap. 4. L. DE BROGLIE ŞI UNDELE PILOT..... 83
Ecuaţia de undă a lu i Schrădinger. Apl icarea mecanicii ondulatorii

Cap. 5. W. HEISENBERG ŞI PRINCIPIUL DE NEDETERMINARE 98
Renunţarea la traiectoriile liniare clasice.
Cap. 6. P.A.M. DIRAC ŞI ANTIPARTICULELE..... 115
Unificarea relativităţii cu teoria cuantică. Fizica antiparticulelor
Cap. 7. E. FERMI ŞI TRANSMUTAŢIA PARTICULELOR 133 Forţele care determină transformările £. Folosirea legilor de interacţiune ale lui Fermi. Cercetările lui Fermi în domeniul reacţiilor nucleare
Cap. 8. H. YUKAVA ŞI MEZONII 142
Cap. 9. LA LUCRU 146
APENDICE *Fausiul* de.....la Blegdamsvej 155
Indice ..... 1-'

Redactor : AUREL JOLTEA
Tehnoredactor : MIRCEA NASTA
Coli *editură : 10,28. Coli de tipar 13 + 12 pajini planşe. Hîrtie tipar înalt tip A €3 glm*. Indici de clasificare zecimală : pentru bibliotcci.e mari : 53, pentru bibliotecile mici : 51.*

16, iar viteza scade de patru ori. Într-adevăr, $4^2 = 16$.

[1] Indicele inferior din stingă simbolului dă numărul atomic, iar indicele superior din dreapta dă greutatea atomică.

* In cazul stelelor mai strălucitoare, de exemplu Sirius, reacţia care produce majoritatea energiei este aşa-numitul ciclu de carbon, propus în mod independent

de C. von Weizsăcker şi H. Bethe.

[1] Joc de cuvinte: a tall man = Tolman. — *N.T.*

IM